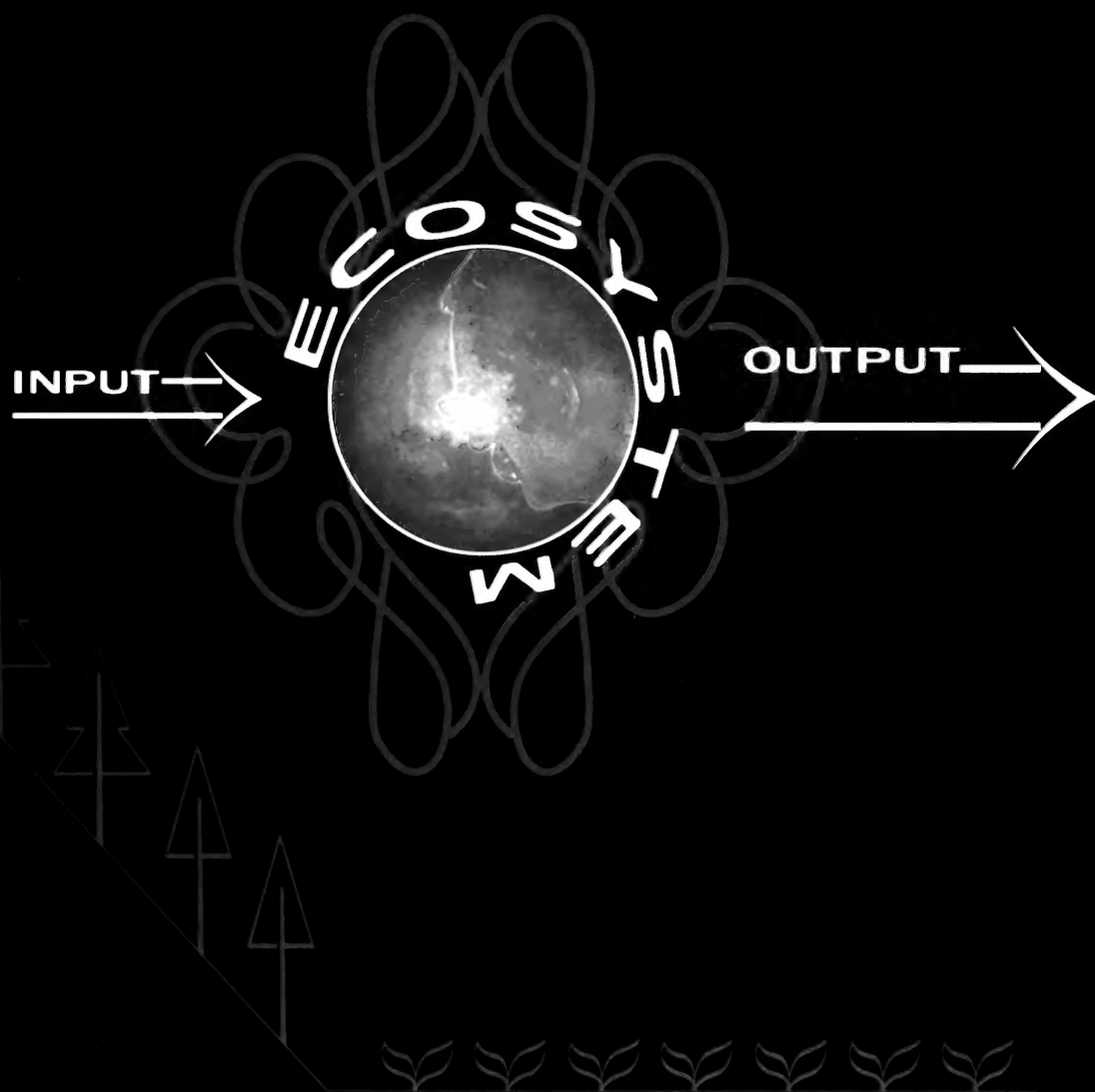


生态控制原理

裴铁璠 金昌杰 关德新 著



科学出版社

www.sciencep.com

责任编辑 袁海滨
侯沈生
封面设计 张祥伟

生态控制原理

裴铁璠 金昌杰 关德新 著

科学出版社

赠阅



中科院植物所图书馆



S0001723

58.181

772

生态控制原理

裴铁璠 金昌杰 关德新 著

科学出版社

北 京

27651

内 容 简 介

本书是作者们多年来研究生态学中控制问题的概括总结。主要包括生态控制原理定义、内容、科学基础与信息资料基础、现代控制理论在生态控制中的应用、确定型和随机型生态控制、非清晰生态控制、生态控制运筹方法、生态智能控制、生态经济控制与可持续发展、生态大系统与巨系统控制等。

本书可供生物学、农学、地学以及与生态控制关系密切的控制论、人工智能、系统科学等领域科技人员参考,也可供相关专业大专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

生态控制原理/裴铁璠等著 一北京:科学出版社, 2003

ISBN 7-03-012522-3

I. 生… II. 裴… III. 生态学 IV. Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 106081 号

责任编辑:袁海滨 侯沈生 责任校对:孙庆华
责任印刷:任继革 封面设计:张祥伟

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮编:100717

<http://www.sciencep.com>

沈阳新华印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003 年 12 月第一版 开本:16(787×1092)

2003 年 12 月第一次印刷 印张:21½

印数:1-1000 字数:524 千字

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

在人口剧增和经济迅猛发展的双重压力下,生态系统严重受损和退化,资源紧缺,环境污染,生态破坏,灾害频繁,直接威胁一个地区、一个国家乃至全世界的生态安全和可持续发展。我国人口众多,人均资源短缺。近百年来,自然资源的大规模开发和不合理利用,强烈地干扰了自然生态系统,造成生态破坏,生态系统功能减退,甚至衰竭,严重影响我国经济和社会的可持续发展。本世纪前二十年是我国全面建设小康社会的重要时期,必须提高资源利用效率,改善生态环境,促进人与自然和谐,增强可持续发展能力,推动整个社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路,而其根本出路在于科技进步。科学技术是认识自然、改造自然和协调人与自然关系活动的结晶,是社会前进的巨大推动力。生态环境问题、社会的可持续发展比以往任何时候都更需要科学技术。

走可持续发展道路,深入研究生态控制原理是一项不可或缺的基础工作。生态控制原理主要研究生态系统的结构、过程及其人为调控,使其朝着有利于人类生存与发展的方向演变。该原理可用于农业、林业、牧业、湿地等产业结构调整 and 生态环境建设。

该书作者长期致力于探索主要生态系统生态过程的动力学机制及其调控,力图通过人为调控提高生态系统生物生产力、改善生态服务功能,服务于可持续发展。该著作源于作者对一系列生态问题研究,通过观察、实验、分析与综合生态学中的控制问题,利用相关数学方法加以归类、计算与分析,同时参考国内外相关文献,形成《生态控制原理》这本专著。该书主要阐述现代控制理论在生态控制中的应用、生态控制运筹原理、不同模式生态优化控制方法、生态智能控制、生态经济控制和综合集成的生态控制。《生态控制原理》与《生态动力学》系姊妹篇,拓展了生态学的研究领域。我们相信,该书的出版必将推动生态学的学科建设与发展,在认识自然、改善生态环境和促进可持续发展方面做出应有的贡献。

2003年5月

2003年5月

前言

当今,随着人口剧增,工农业迅猛发展,人类活动强烈地干扰了地球上的自然生态系统,造成生态破坏、生态系统功能减退,甚至衰歇。人类倘若再不规范自己的行为,协调人与自然的关系,将会随着社会经济的发展而走向毁灭。这不是危言耸听,而是有目共睹的现实。呼吁全人类全社会行动起来,都来保护与恢复自然生态系统。特别是生态学家应尽快找出既发展经济又不破坏环境的可持续发展途径,为人类社会做出应有的贡献。

走可持续发展道路,深入并拓展生态学研究是一项不可或缺的基础工作。生态学研究,初期着力于研究生物与环境间相互关系,随着人类活动对自然生态系统破坏加剧,著名生态学家 E. P. Odum 高瞻远瞩,于 1997 年明确指出“生态学是一门联系生物、环境和人类社会有关可持续发展的系统科学”,作者循可持续发展的社会需求与生态学学科发展需求,撰写了《生态控制原理》。

迄今,国内外已出版的书籍中,尚未见到与本书稿的框架、内容类同的著作,以往涉及控制论方面的专著,有《控制论》(Norbert Wiener, 1948)、《生物控制论》(苏达科夫, 1969;涂序彦, 1980)、《生物进化控制论》(裴新澍, 1999)、《人口控制论》(宋健等, 1985),还有《大脑设计》(艾什比, 1954 年第一版, 1962 年第二版)、《经济控制论》(曼内斯库, 1986)和《工程控制论》(钱学森等, 1981)等。20 世纪 60 年代的《生物控制论》主要研究生物系统内各部分相互联系与制约,动物和人体稳定性,以及生物自我调节控制问题,后来增加了脑系统、生物大分子系统等,近期增添了器官细胞等。《人口控制论》是经济学中人口学的分支,但是人口控制实质也是人类种群控制问题,它具有生态控制的内涵。至于《工程控制论》是阐述与生态学无关的控制问题,全书 130 万字仅一次提到生物环境。《生态控制原理》系《生态动力学》的姊妹篇,主要阐述在生态动力源驱动下生态系统运行及其人为调控,提高生物生产力、改善生态环境,服务于可持续发展的基本理论。与上述控制论方面书籍有联系,但思路迥然不同。以往用来表示生态控制的 ecological control (王孟本, 2001)远未包括生态控制的全部内容,它只是我们所说的生态控制的一部分。我们提到的生态控制可用 ecological cybernetics 表示,但也不限于 cybernetics 的内容,只是英语中没有更适合的词,我们所说的生态控制系指全部生态控制问题的掌舵术。凡是生态控制问题均归于本书,除了 cybernetics 的科学范畴,还包括运筹控制、信息控制等,然而,最后两个问题不能归于 cybernetics。

《生态动力学》主要阐述生态过程的动力学机制,而《生态控制原理》侧重介绍生态动力源驱动生态系统及其人为调控,使其朝着有利于人类生存与发展方向进行的基本理论。前者主要是认识自然,而后者着重改造自然。以往,囿于人们对自然生态系统的认识,在改造自然中存在着盲目性,因此必须深入研究生态动力学及其控制原理,以利人类更好地认识自然,改造自然,提高生物生产力,改善生态环境,加速实现可持续发展。

本书选题由裴铁璠提出。

全书共分十一章,前三章阐述生态控制原理定义、概念和主要内容,还有生态控制原

理的科学基础与信息资料基础;第四章讲述现代控制理论在生态控制中的应用;第五、六章介绍确定型和随机型生态控制;第七章论述非清晰生态控制;第八章叙述生态控制的运筹方法;第九章论述生态智能控制;第十章讲述生态经济控制与可持续发展;第十一章介绍生态大系统与巨系统控制。

第一、四、五、七、八、九、十一章由裴铁璠执笔;

第二、十章由金昌杰执笔;

第三、六章由关德新执笔;

全书统稿由裴铁璠完成。

由于本书涉及内容广泛,作者的知识深度和广度极为有限,故书中缺点与错误在所难免,诚请广大读者批评指正。

作者

2003年3月

目 录

序 言	(I)
前 言	(Ⅲ)
第一章 绪论	(1)
第一节 定义和内容概要	(1)
第二节 生态控制原理的科学基础概论	(6)
第三节 生态控制原理的技术依托、资料及信息	(9)
第四节 生态控制的时空尺度	(11)
第五节 生态控制系统复杂性、开放性与相对封闭性	(15)
第六节 科学价值和实用领域	(19)
第七节 发展方向、前景展望及存在问题	(20)
参考文献	(23)
第二章 生态控制的科学基础	(24)
第一节 生态控制的数学基础	(24)
第二节 生态控制的物理学基础	(33)
第三节 生态控制的化学基础	(42)
第四节 生态控制的地学基础	(52)
第五节 生态控制的生物学基础	(58)
参考文献	(60)
第三章 生态控制的信息资料基础	(61)
第一节 古典文献中的生态控制资料	(61)
第二节 遥感影像资料的生态控制信息	(63)
第三节 源于 GIS 的生态控制信息	(68)
第四节 计算机系统、数据库、网站中的生态控制信息	(70)
第五节 生态控制的最新信息源	(73)
参考文献	(77)
第四章 现代控制理论在生态控制中的应用	(79)
第一节 典型现代生态控制系统及数学模型建模原则	(79)
第二节 生态控制系统描述与分析的状态空间方法	(82)
第三节 最大值原理在最优生态控制中的应用	(85)
第四节 Bellman 动态规划原理在最优生态控制中的应用	(102)
参考文献	(109)
第五章 确定型生态控制模式	(110)
第一节 农作物及杂草生态控制模式	(110)
第二节 树木生态控制的最优策略	(119)
第三节 湿地管理及水文生态控制	(123)

第四节	与动物(含人)有关的确定性模造	(135)
第五节	相对闭合生物环境的生态控制	(150)
第六节	工业废热与土壤及近地面空气生态动力源控制模型	(156)
参考文献		(158)
第六章	随机型生态控制	(161)
第一节	试验统计的生态控制模式	(161)
第二节	动物性别对抗与交尾优化控制模式	(170)
第三节	最优饲料理论:统计模式	(174)
第四节	生态控制随机过程	(174)
第五节	马尔可夫链与生态产量预测控制	(176)
第六节	集对分析及新集对论在生态控制中的应用	(179)
参考文献		(182)
第七章	非清晰生态控制	(184)
第一节	非清晰问题及其控制原理	(184)
第二节	模糊生态控制	(186)
第三节	动植物生境的灰色控制	(191)
第四节	区域开发生态经济控制:灰色局势决策	(196)
第五节	混沌生态控制	(200)
参考文献		(212)
第八章	生态控制的运筹方法	(213)
第一节	运筹学与生态控制	(213)
第二节	生态控制决策方法	(214)
第三节	生态控制的 Марков 决策过程(MDP)	(218)
第四节	生态控制的 Nash 博弈	(223)
参考文献		(233)
第九章	生态智能控制	(234)
第一节	传统生态控制与智能生态控制	(234)
第二节	生态信息控制中的模式识别技术:通论	(234)
第三节	生态控制信息模式识别技术实例	(242)
第四节	生态控制集成型模式识别	(256)
第五节	生物图像信息	(258)
第六节	人工神经网络在农田生态控制中的应用	(259)
第七节	人工生物环境温度的智能控制	(261)
第八节	生态控制专家系统	(262)
参考文献		(266)
第十章	生态经济控制与可持续发展	(268)
第一节	能值利用、环境负荷与生态经济的可持续发展	(268)
第二节	城市生态环境及其可持续发展的生态经济控制	(277)
第三节	水域附近生态经济最优控制	(282)
第四节	可持续农业(SA)问题的多重标准分析	(283)

第五节	农业生态-经济-社会可持续发展的层次	(287)
第六节	林业可持续发展的树苗基地策略	(292)
第七节	分布参数系统在畜牧生态经济控制中应用	(295)
第八节	生态-经济工程随机微分控制	(298)
第九节	GIS在植被可持续发展管理中应用	(301)
参考文献	(306)
第十一章	生态大系统与巨系统控制	(308)
第一节	大系统巨系统生态控制——生态控制发展新阶段	(308)
第二节	大系统生态控制	(309)
第三节	简单巨系统生存竞争模型	(315)
第四节	开放的生态复杂巨系统及其控制	(322)
参考文献	(331)
后 记	(333)

第一章 绪 论

生物依赖环境,同时也在改变环境。这种关系早在古代就为人们朦朦胧胧地感受到了。随着科学技术的发展,逐步形成并日臻完善的生态学(ecology)。尽管关于什么是生态学,不同时期的学者给出的定义不尽相同,但大同小异,通常概括为:生态学是研究生物与环境关系及其相互作用的科学。在生态学向应用数学化、生物物理化、高新技术化方向进程中,一门隶属生态学的交叉学科——生态动力学(ecological dynamics 或 ecological kinetics)应运而生。近年出版的《生态动力学》(科学出版社,2001)一书给出:生态动力学是生态学和动力学的交叉学科,研究生物、环境和人类社会相互作用及可持续发展的动力学机制与途径。本《生态控制原理》系《生态动力学》的姊妹篇,它是以生态动力学和控制论为主要基础,通过调控生态动力源—汇关系,旨在提高生态系统生产力、保护并改善生态环境的原理、方法与途径。本章将阐述其内容、学科基础、技术依托及信息、时空尺度、复杂性、开放性、科学价值及发展方向等,作为绪论,只能是一种概括,更为详细内容,将在后面章节中详述。

第一节 定义和内容概要

什么是生态控制原理?它包括哪些内容?通常是指生态动力源驱动生态系统运行及其人为调控,使其朝着有利于人类生存与发展方向进行的基本原理,都属于生态控制原理。下面我们分述其基本定义和重要内容。

一、基本定义

生态学在多年发展的历程中,新概念、新定义、新原理和新技术方法不断涌现,在 20 世纪和本世纪初,尤其是这样。同许多其他学科一样,生态学许多分支的发展规律,一般也是从定性走向定量,从运用一般语言的描述到运用数学语言刻画;从运用初等数学到运用高等数学;从运用经典的纯数学到运用面向实际生态问题的应用数学;从运用古典数学到运用现代数学。与此同时,它也运用其他自然科学分支,还有隶属社会科学领域的生态经济学。由于数学以及其他基础科学的不断发展,生态研究针对的对象不断增加,应用领域不断拓宽,许多新的分支学科不断发展。近年出现的生态动力学是从生态动力源—汇关系出发探讨生态学中的动力学问题的一门新兴的分支学科,是探讨可持续发展的动力学机制和途径,当属服务于可持续发展的自然科学原理方面的著作之一。为使生态学能够向着有益于认识自然和改造自然的目标前进,只深化其动力学基础,尚显得不够充分,因为生态动力学是以认识自然为主旨,而在生态学为改造自然服务方面,优化调节、优化控制、优化管理,显得十分必要,所以急需有这方面的专门且系统的理论书籍。与此同时,人们在改造自然的多种多样实践中,调节、管理与控制生态动力源—汇关系的客观动态方式是很多的。这种调节、管理与控制的实践活动无论是自觉的,还是非自觉的,尺度是不尽相同的。从宏观上可大到全球,此为工业化以来向大气中排放 CO_2

量的增加,影响全球的生态环境;从微观上,一座温室、一个鱼塘,一个蜂房乃属于微环境调节,均为生态控制范畴。无论是自觉或不自觉的控制,调节、管理和控制得好的例证很多,比如生态县建设。调节与控制得不好的例证,也是有的,比如毁林垦荒。我们的目标是,让调节与控制尽量避免盲目,逐步走向自觉。使其应用数学化、客观定量化,以利可持续发展,减少失误。我们写这本《生态控制原理》,正是实现上述宗旨的一项不可或缺的基础工作。

提到控制原理,人们往往会联系到“控制”(control)这一科学术语,进一步联想到技术科学工作者(如自动化学科领域的基础研究人员)常用的“控制理论”(control theory),如果结合到生态问题加以推理,则应是“控制理论在生态学中的应用”(application of control theory to ecology),这样的联想和推理所涉及的内容并不全面,因为它实质上只是我们所说的“生态控制原理”(principium of ecological cybernetics)的一个组成部分,并且只能说是—个比较小的组成部分。如所周知,控制理论只是控制论(cybernetics)的一个组成部分;退一步说,即使我们假定生态控制原理是控制论在生态中的应用(applications of cybernetics to ecology),这也不能全面概括作者思想中的生态控制原理的原意暨本意。为了解释这一问题,让我们首先谈一谈对“控制论”一词的初步认识。控制论诞生于1948年(以Norbert Wiener 所著 *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*《控制论:或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》初版为标志),而 cybernetics 这个名词是很早就有了。一般认为,该名词源于希腊文 κυβερνητις,在古希腊著名哲学家柏拉图著作中,其意义是“掌舵术”(现印欧语系多种文字表达大同小异,德文 kybernetic,法文 cybernétique,西班牙文 cibernética,意大利文 cibernetica,荷兰文 cybernetica,波兰文 cybernetyki;而日文片假名,サイバネティックス),而不限于从中文字面意义上所理解的“控制理论”。对此,《生态动力学》一书亦曾提及。在汉语中,在自然科学中正式起用控制论一词是1958年戴汝为院士译钱学森院士所著英文版的 *Engineering Cybernetics* (1954)一书。据戴汝为院士介绍,前苏联学者将 engineering cybernetics 译为俄文版时,曾征求钱学森意见,钱说是 технологическая кибернетика。可见工程控制论的一般而直观的意义应当是:“技术科学之掌舵术”;就此可能有人推理:生态控制论(ecological cybernetics,экологическая кибернетика)是“生态学的掌舵术”。当然,至今尚未见有“生态控制论”这样的专著,或者说人们对生态控制论这门学科的认识远远没有达到统一。曾庆存院士曾提出自然控制论,似应是比生态控制论有更为广泛的内容。但是,我们可以认为:生态控制论(或者通俗地说,是生态方面的管理、调节与控制的掌舵术)亦应属于生态控制原理组成部分。其次,我们这里所说的生态控制原理或曰“生态掌舵术”,其内涵绝不限于控制学科所限定的控制论意义;控制论绝非是生态控制原理的唯一支持学科。因为,从本书以后章节的内容,读者将会看到:所用数学描述方法,基本原理和算法远不限于经典控制论、现代控制论和大系统理论的框架,它还用诸如概率论、随机过程、泛函分析、系统论、模糊数学、混沌理论、运筹学等多种数学和系统科学分支学科的内容,而这些分支学科并不在 cybernetics 的范围之内。当然生态控制原理也包括用现有数学方法尚不能很好解释的经验控制。这是因为经验丰富也有益于生态控制。这些有的可用人工智能专家系统加以处理,有些则不能,但经验所产生的优良控制结果不可忽视,并可积极应用,在应用实践中,再找出其理论依据。“生态控制原理”既涵盖控制论方法,也涵盖现代控制理论方法,但它又不局限于这些方法。这是以生态动力源-汇关系的优化调控为

目标。它实质上应当是广义的生物控制论的一个重要且独立的组成部分,而且经典生物控制论并不能概括生态控制论的基本原理。在控制论及其主要分支学科发展历程中,生物控制论,几乎是与工程控制论同时间被提出并获确认的分支。在我国,1980年出版了涂序彦教授的《生物控制论》这部专著。继后,他又发表了《大系统理论》。但是这两本书均未有本书将要论述的“生态控制原理”的内容。

本书的主要内容系作者们20多年来研究生态学及其控制原理并广征博引国内外有关文献的总结。它的出版必将充实生态动力学改造自然的功能手段的科学机理,拓广数学新方法在生态控制中的进一步深化应用,力争为生态学的知识创新上一个新台阶做出微薄贡献。其终极目标当然是为优化人类生存环境,实现可持续发展。

二、内容概要

生态控制原理,既然是以其原理探索为出发点,以服务于社会为落脚点,并成为农林环卫等应用学科的基础之一。上述原则使该学科主要内容具有理论基础深厚性、时空尺度广泛性、学科交叉多元性、实际应用复杂性的基本特征。

1. 主要科学基础

生态控制的对象生物和环境之间的关系,或者改变环境使其更加有利于生物生长,或者调节生物关系使其适应环境,或者两者兼而有之。但无论哪种方法一般都涉及非生物的、生物的生态动力源,涉及各种生态动力汇,所以凡与生物(植物、动物、微生物)有关的自然科学中的多种分支学科,都是与生态控制的基础分不开的。数学之所以被许多研究者视为“科学之王”,在于它能够客观地反映关于量和空间的特有规律。生态控制,事实上早已应用数学作为指导。只是在科学不发达时代,生态控制运用的是简单的初等数学,随着数学本身发展到高等数学阶段,也应用了高等数学,不过是在力学、物理学、天文学运用之后的许多年。物理学中许多分支学科,事实上也早已用于生态控制之中,这包括力学、热力学、电学、光学、原子物理学及其中的更细的分支学科。化学主要用于营养生态动力源的控制。地球科学中的土壤学、地貌学、气象学、水文学,虽为非生物性质的,但只要作用于生物,便成为直接的生态动力源,于是它们构成生态控制的直接基础学科。生物学中的许多非生态领域学科,构成生态育种、生物营养、生物防治之基础,而这些均与生态控制密切相关。

自然科学中分支学科或直接或间接地作为生态控制的基础,这种基础的作用不是孤立的,而是相互关联的。我们只是为了方便,往往分别研究,但也同时注意不同层次的内在外在关系,或筛选出其中主要者。

社会科学中的经济学,也是生态控制的基础之一,这是因为,如《生态动力学》中所说,人类活动生态动力源(human activity eco-dynamic resource)属于生态动力源的范畴,尤其是生态控制中的自觉控制总是由人来设计,人来建设,人来完成。这必然涉及到活劳动的优化控制,以便在可持续发展中取得事半功倍的生态控制效果。

2. 资料信息基础

由于生态控制原理内容十分广泛,所以它所涉及的自然科学各学科的大量基础资料,一般都可以作为它的资料基础。

利用现代技术,目前主要有三种信息系统的资料,可随时用于生态控制的业务和研究工作之中,它们是:

(1) 地理信息系统

地理信息系统把地图信息、遥感图像信息和其他有关人口统计、土地利用、自然资源、能源交通等信息集成起来,通过计算机统一管理,可快速检索各种形式的综合信息。在地理信息系统中,有关自然地理的信息,绝大多数可构成生态动力源因子;在涉及人文地理、经济地理的信息中,有些与生态经济有关。地理信息系统及其数据库是生态控制所需信息的重要来源之一。

地理信息系统数据可分为第一手数据和第二手数据,根据存储形式也可分为非电子数据和电子数据。

地理信息系统中,图像数据库系统 System - W(《石青云文集》,2001)是结合图像数据库,图示语言等新兴学科分支的研究成果,重点研究了地图自动输入、地理实体的综合信息查询、友好用户界面等地理图像数据库系统软件。

友好用户界面对系统的关系转化及其推广应用具有重要意义。

(2) 卫星遥感信息

从遥感影像资料中提取有关地学、生物学信息,弥补地面调查与观测资料的不足,特别是在人们无法实地观测与调查的区域,从遥感影像中获取有关资料,是从事不同尺度,尤其是大尺度生态学研究所必需的。

遥感兴起于 20 世纪初,1910 年第一次从飞机上拍摄地面照片,开创了近代航空摄影的先河。遥感技术应用于生态学始于 20 世纪 30 年代,60 年代开始了卫星遥感的研究,1972 年第一颗地球资源卫星(Landsat 1)发射成功,成为遥感发展史上另一个重要里程碑,直到 1994 年的 Landsat 7,功能逐渐完善,其空间分辨为 10~30m,NOAA 气象卫星地面分辨是 1.1km。法国 SPOT 系列卫星分辨率已达到 10m。而近年发射的小卫星 KO-NOS 分辨为 1m,适于在景观生态系统尺度上进行遥感分析。

遥感技术可应用于自然资源动态监测,诸如,土地利用状况、森林覆被、草地资源调查,还可以应用非生物生态动力源及灾害监测,像沙尘暴、洪水、霜害危险地带的探测,积雪遥感调查、酸雨监测;还有农作物种植面积、苗情以及产量评估的监测等。

(3) 信息网络数据

信息网络这些年发展迅速。在发达国家已有较为完善的系统专门用于生态监测。如 2002 年初, <http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux/scif.htm> 报道了 Ameri Flux Network 的现行状况。该网反映陆地生态系统 CO₂ 净通量,旨在了解 CO₂ 交换的支配因子,以便确定对气候变化、空气污染和 CO₂ 浓度的影响的重要反馈机制。

一般的常用信息网络,如因特网(Internet)包括许多可用于生态控制信息。Internet 的出现是 20 世纪信息技术发展的必然结果。其中含有与生态动力及其控制有关的大量信息,通过 Internet 达到“集智慧之大成”,使生态控制诸多理论和具体技术问题得以解决。这当然需要通过人机结合作业方得以实现。由于 Internet 是一个特殊的复杂系统,用之应以正确的科学方法论为指导。如运用钱学森院士在前些年提出的从定性到定量的 Hall for Workshop of Meta - Synthesis Engineering 系统,会取得新的成绩。

值得注意的是网络科学新技术给予生态控制带来信息的实用性,并非一般人可望不可及。在目前,只要掌握运用它的生态控制原理,尤其是智能控制原理(本书第九章),就会变成农户可用的技术,更不用说科技工作者和政府职能部门管理者。在我国,据 2002 年 7 月 22 日新华社发布的消息,网民数量已超过 4500 万人,仅次于美国和日本,排在世

界第三位。就拿技术原本比较落后的辽宁省法库县来说,到 2002 年 7 月时已建成贯通全县的信息网络。在农村网络中,生态方面信息将日益丰富。

3. 现代控制理论的应用

张钟俊院士曾指出:现代控制理论是控制论的核心。其实,更确切地说,现代控制理论是控制论发展到现代控制论阶段的一种主要理论。在工矿企业自动化等领域,现代控制理论最早被应用。由于近年来,生态动力学问世并向着数学化、自动化方向的发展,由于生态学研究考虑到动力学的作用,所以在生态控制原理中,充分利用现代控制理论(主要是 Karman 滤波、Bellman 的动态规划和 Понтрягин 的最大值原理),是非常必要的,也是完全可能的。

当然,由于生态控制问题所涉及到的许多原则,与工矿自动化相比,其随机性和振荡性非常大,所以使用微分方程(组)的表达不可能像对待刚体、流体运动那样十分确切,或者形象直观一点说,存在着牵强附会的成分,但探索规律,在目前尚不能算为时过早。比如在气象学上,仿照天文预报提出用流体力学微分方程作数值预报的方法,至今也不可能像天文学那样准确,但如果不是在 20 世纪 80 年代前提出这种方法,也不会有今天的中期预报的准确率。尽管这样的 120h 内的气象预报,还没有办法同天文预报(提前几百年)相比,但这是微分方程在地球科学中的应用范例。坚信,今天用现代控制理论对生态原理的研究,终将在未来生态学及其控制中结出丰硕的果实。

4. 生态信息的动态与随机控制问题

由于生态系统不但具有确定性特性,还具有随机性特性,就其随机性方面,应用机会数学比应用微分方程更简单便捷。但是,生物物理与生物化学机理难以解释。由于生态学中存在着大量的随机问题,因此,概率和数理统计学这种机会数学,大有用场,可用以解决此类问题的数学分支还包括稳定性、混沌性、突变、协同、马尔可夫过程以及平稳随机过程等等。研究的目的在于认识和控制信息动态,为即时的生态控制提供信息科学基础。一些关于随机过程的书籍,可能有很好的参考价值,如北京大学钱敏平等编著的《应用随机过程》(北京大学出版社,1998)。

5. 非清晰生态控制问题

对于生态系统控制的认识,无论是大系统还是小系统,除确切性、随机性之外,还存在着模糊性,也有灰色系统的说法。在《生态动力学》一书中,作者运用的“非清晰”概念可用以作为我们这里说的生态控制原理的一个定语。这样,就把近几十年来的模糊数学及灰色控制系统和混沌控制等表达的非清晰概念和数学方法统一起来,用于解决非清晰生态控制的原理与应用问题。一些著名学者很注意模糊控制。如钱学森院士 1993 年 12 月 21 日致于景元的信中说:“用到模糊控制,这个方法的优点在于它不要求知道受控系统的动力学性能,只要求知道或测其瞬间状态。此方法设计出的控制有极强的适应能力。这是处理复杂巨系统的一个非常重要的优点”。这一论述彻头彻尾地适用于生态系统中的模糊控制。至于在生态实践中用得如何,则要看非清晰生态控制原理(本书第七章)研究进展得如何。

6. 运筹原理

运筹学发展到今天,已有相当丰富的内容和各种计算程序、软件。它的许多具体分支何以能处理生态控制中的某些具体原理问题呢?这部分以具体控制对象为背景,举例说明一些运筹原理的运用。有了这些例子和原则运算方法,当可在遇到具体问题时,在

具体分析的基础上,找出相应方法,用已有软件和数据(包括数量化结果)进行运算与处理。

运筹学本身在不断发展,人们对生态控制对象的认识在不断深化,计算用的数学软件在不断优化,所以在运用一般原则不变的前提下,控制技艺也应不断提高。

7. 机理与经验、半经验控制

对一些生态控制问题,人们从机理和经验、半经验角度已有比较正确的认识。也就是说,有些机理明确的问题,人们无须作复杂的计算,即可控制。像盆地易受霜冻是由于冷空气下沉所致,据此可作出人为控制。然而,有些生态过程的机制不清楚或不十分清楚,这就难以应用理论计算出设计方案,这时就需要凭经验,或半经验半理论来进行控制,诸如大面积混种的农田的灌溉水量、观测资料不足的草地刈草高度、温室温度等,详见本书第六章第一节,这些有许多内容可以结合到随机控制之中。

8. 生态领域智能控制

人工智能是尽可能地用机器体现或模拟人的智能行为,并且希望通过在这方面的努力,最终有可能改善并超出人的能力。如所周知,生态控制是人类改造自然的手段之一。但其领域如此广泛,以致人们很难用人工方法,控制人的智慧和力量使其达到十全十美。供需矛盾,使生态控制失衡,也就是说,生物环境失控乃至生态动力功能锐减,在历史上屡见不鲜。随着现代科学技术发展,生态控制朝着自动化方向发展,已从梦幻逐渐走向现实。在人们以往的印象中,一提到自动化就联想到机器、电力、工业企业自动化等,即首先想到的是体力劳动自动化,但事实上脑力劳动自动化尤其重要,然而常常被人们忽视。这一部分主要通过模式识别(pattern recognition)和专家系统(expert system)在生态控制中可能应用原理的论述,指出生态控制中脑力劳动自动化原理及其主要应用场合。在这方面,我们在 20 世纪 80 年代得益于我国著名人工智能学者戴汝为院士的启发,为后来的生态控制思索与研究奠定了基础。

9. 经济原理与可持续发展

生态经济控制是试用经济控制论于生态建设及可持续发展的尝试。这一部分可以说是从控制论角度研讨生态经济的一点认识的总结。在《生态动力学》一书所涉及的数学方法基础上,进一步从定量和数学原理上阐明生态建设与可持续发展的生态经济原则,并将大系统理论的某些原则引入该领域之中。

10. 综合集成控制

鉴于生态系统的复杂性和人们对该系统认识的有限性,在现阶段以致在今后相当长的时间内,尚不能定量而确切解决生态控制中的全部重大复杂问题。因而,本部分将阐述钱学森等提出的综合集成方法论(meta-synthesis methodology)在生态控制中应用的一些问题。其实,关于“集智慧之大成”和“集腋成裘”的想法,我国古代早已有之。但在没有高等数学的年代,就只能是定性的。直到 1990 年钱学森院士、于景元研究员和戴汝为院士提出处理开放的复杂巨系统的方法——从定性到定量的综合集成方法。受戴汝为院士的启迪,作者们在同年开始将该法尝试用于生态控制,本书第十一章将予详述。

第二节 生态控制原理的科学基础概论

钱学森院士曾明确指出,在六大基础学科——数学、物理学、化学、天文学、地球科

学、生物学——中,数理化是基础的基础,而数学和物理学是最基础的两个并行的学科。换言之,它们应是除自身之外,自然科学的其他一切分支的基础,即自然科学的一切分支都是在数理科学之基础上发展起来的。作为生态学一部分的生态控制原理也毫无例外地依托数理化天地生这些基础学科。所以说,以基础学科作为基石,确定生态控制原理,是生态控制原理的第一个组成部分。因此,我们在本书中将要辟为一章专门论述生态控制的数理化—地学—生物学基础。

首先要阐述的是基础数学在生态动力控制中的应用问题。许多著名学者都非常重视数学,就以科学技术突飞猛进的 20 世纪来说,包括生态控制在内的许多具体分支学科都离不开基础数学。前苏联著名数学家 Виноградов 曾明确指出:“一个国家,如果数学不行,其他一切科学就谈不到了”。基础数学亦可理解为纯数学。一些研究者,在某个阶段,可能认为应用数学用于解决地学、生物学方面的具体问题比较直观和有效,甚至会取得立竿见影的效果,比如用数理统计中的回归分析作出一个生态产量依赖生态动力因子的方程,代入观测数据即可作出预报。而数学中的许多基础,诸如场论、群论、数论、线性代数、近世代数、突变论、拓扑学、泛函分析、微分几何等,虽不易直接用于生态控制问题,但有些作为人们直接应用的数学分支的基础,如群论是正交设计的基础,数论是均匀设计的基础;而这两种设计常用于生态控制试验(本书第六章)。但据此而忽视关于基础数学用于生态控制的学习,以致放弃这类研究,那则是急功近利,违背基础学科用于某一具体学科以致发展具体学科的一般发展规律的。从数学应用的一般规律来说,纯数学终会用于各门学科,只是有些应用得快些,有些应用的周期相当长而已。从自然辩证法的一般规律研究,许多学者指出纯数学的现实意义,如美国数学家 F. E. Brouder 和 S. M. Line 指出:“对数学思想的每一个重大贡献,都是基本上可以应用的……我们甚至敢于断言,每一个重要的数学关系必定在物理现象、生物现象和社会现象中有重要作用。”关于基础数学在生态控制中应用的一些场合与实例,比如微积分、突变论、群论、数论等的应用,将体现在本书有关章节的内容之中。关于应用数学在生态控制中的应用,则是比较直接的。如微分方程组是现代控制理论的基础,用于生态控制问题将视为生态控制方程组的合理构成和物质基础。而由于生态控制中,许多现象内涵、因果关系等有着随机性,所以反映事物偶然规律的概率论及数理统计理论在生态控制原理中的应用,是许多生态工作者熟悉的。本书将在许多场合论及这些问题。

其实,数学在生态控制原理乃至整个生态领域中的应用,是在 20 世纪科学技术数学化进程中的一种突出表现。20 世纪科学技术数学化的最为明显的特征是:原来较少应用数学的遗传学、心理学、经济学、社会学、生态学等领域转向了广泛应用数学语言、方法和模型进行定量研究和系统分析。数学方法的应用,已经使生态学日益摆脱了单纯对生命与环境关系进行客观描述的局面,逐步从定性研究转向定量研究。这也符合“社会愈进步,应用数学的范围也就会愈大,所应用的数学也就愈精密,应用数学的人也就愈多”(华罗庚《大哉数学之妙用》,1959 年 5 月 28 日《人民日报》)的论断。

生态控制原理为什么要应用数学呢?主要有如下三个方面:其一,当代生态控制研究日益精细的抽象化,为数学方法在其中的应用创造了基本条件。与许多学科发展同步,20 世纪中期以来,生态学完成了对有关事物及自然现象乃至可持续发展的定性描述,开始在大量科学素材的基础上,借助于数学进行科学抽象、定量研究和理论加工,现代化的地学、生物学实验技术设备与检测手段的广泛应用,大大提高了测量的精确度,积累了

生态控制方面的大量数据,促进了数学在其中的应用。其二,数学本身的发展,为在生态学领域应用数学的理论和方法打下了坚实的基础。数学领域中的每一突破性进展,很快被包括生态控制原理在内的其他学科用于解决一些根本性理论和实际问题。如非参数统计方法的进展被用于解决数据有限条件下的生态灾害分析与运筹问题。模糊数学用于生态动力相似分析。改进的 Чебышев 多项式用于生态产量预报。灰色系统控制理论用于生物防治。属于微分拓扑领域的突变论用于火险与种子生态动力源的研究,都促进了生态学向着数学化方向发展。其三,计算机的发展和广泛应用,为生态控制的数学化提供了有力的技术手段。回顾生态工作者使用计算工具的历史,不难发现:在我国,在 20 世纪 60 年代初,只能用算盘和手摇计算机进行简单的统计计算,在 70 年代初,也只能用计算器,那时即使作一些回归分析,也要用相当大手工计算量。而 80 年代以来,从 PC-1500 到 Apple II,再到 FelixC512,直到现代各种计算机器的应用,使生态工作者使用数学方法和运算能力发生了非常大的变化,使以往许多无法计算的复杂的生态控制问题,变得简单易行,使在生态领域中处理大量数据和分析复杂关系成为可能。在《生态动力学》(科学出版社,2001)一书中所介绍的关于 Monte Carlo 方法在生态研究中应用等数学方法的实例,说明计算机的模拟功能为解决生态控制问题提供了便捷高效的手段。因此可以说计算机的广泛使用加速了生态控制的数学化趋势的进程。

在生态控制中,应用物理学各分支也很重要。比如在《生态动力学》一书中所说的重力生态动力源中的石头和雪,在某种情况下,会构成对果树(苗木或成林)的危害。在山区果园中,果农把位于果树所在高度之上的梯田加固,防止泥石流砸伤果树。又如在大雪过后,及时摇掉果树枝条上的积雪,减轻枝条承雪的重力。这本质上是从力学出发控制有威胁性的生态动力源(石头、泥土和雪)以免生态动力汇(果树)受害的措施。物理学中热力学作为生态控制原理的事例,比如温室的透光薄膜是把一级生态动力源——太阳——通过辐射方式透射到温室中的热量用以提高温室内空气和上层土壤的温度,而温室是植物(蔬菜、果树等)、动物(猪、鸡等)和食用微生物(蘑菇等)的生存环境,这个热传递的辐射控制手段,则是用热力学原理控制生态环境的一个例子。温室通风或二氧化碳调节,则是用对流热交换原理控制生态环境的一种手段。而对于育苗温室(即《生态动力学》第十二章介绍的棚中棚),在栽苗用营养土之下放 20cm 厚马粪,则是通过马粪发酵增温的例子,也属于用热力学原理调节生态环境的例子。利用电学原理调节生态环境的例子,比如在育苗温室安装电灯,提高棚中棚气温。又如冬季寒冷季节时,为防御低温而在温室中设置地热线、将电能转化为热能,通过热量控制环境温度。光对生物环境影响的调节,比如东北大垅双行玉米种植技术就是充分利用太阳光这个一级生态动力源的例子,即提高光能利用率的例子。至于核农学中,利用原子物理学中的方法进行育种,则是用核技术改善种子生态环境的先进技术。

化学在生态学中的直接作用,比如施 N,P,K 肥料的适宜环境,则是改善作物营养生态动力源的措施。

除数理化之外,基础学科中的其他学科对生态控制原理,直接或间接地起作用。我们这里主要举出地球科学方面的生态动力源的例子。在土壤方面,土壤的形成、质地、物理化学性质等构成农林牧草各种作物的生存基础,所以土壤改良一直受到重视。在大范围,对盐碱地的改造,可改善作物的重要生态环境;与此同时,与基因科学和生态动力源的结合,会使盐碱地区的农业发生根本性变化。如辽宁盐碱地研究所许雷培育的辽盐系

列品种,就是以种子生态动力源的本质优化适应不利的土壤化学生境的成就。气象条件是多变的生态环境,以改善和管理气象生态条件即调控气象生态动力源的例子不胜枚举。建设西部防护林防风沙,改善农田小气候条件。水文方面,诸如在森林流域对河道两侧坡面进行非对称采伐森林,使降雨通过非对称采伐的下垫面,不同时到达河道,通过人为控制使其河流洪峰流量降低,减轻森林流域洪涝灾害。调节生物间关系,是以生物学为基础的生态控制措施,如作物结构调整、间混套作,农林复合系统等。

从上述可略知自然科学中许多学科都是生态控制的基础。尽管除生物间关系外,许多要素诸如温度、径流、大气成分及其浓度,土壤质地等构成生物环境时,都只是非生物的生态动力源,但它们对生物的作用十分重要。为发展生态控制原理,跟踪作为生态控制基础的其他学科,显得尤为重要。

随着自然科学基础学科不断发展,生态控制原理的研究,也在不断深入。在应用基础学科解决具体生态控制问题时,首先应注意到学科交叉的性质,而不必把学科分得过细,比如在考虑地学方面的生态动力因子时,一般不可避免接触有关新的数学方法和理化实验技术,此时不易细分学科;其次,要敢于应用,善于应用新的基础学科成就,不必待发展完好后再去应用,在应用中发现有问题应及时纠正;第三,在研究工作尚未达到实用的条件下,不要随意推广于生产实际,而应先行点试验和中试;第四,积极学习其他学科用数学理论一些分支于所研究学科的经验,促进在生态控制原理中应用水平的提高。如丑纪范院士早在 1962 年将泛函分析用于气象学的成果,至今仍值得我们学习。

第三节 生态控制原理的技术依托、资料及信息

生态控制原理的初步形成和发展,依赖于现代技术即人们通常所说的高新技术。至于在早年形成并为生态研究与实践普遍应用的机械、电力、电子、生理生化等在 40 多年以前已经通用的技术当然还要继续使应用,但在本书以后章节不予具体论述。

一、信息、计算机技术与生态控制

信息与控制是不可分离的。在信息不发达的时代,对生态控制的认识只能是直观和局部的。比如人们要控制昆虫的动态,并且从感性认识上已经知道昆虫迁飞与气流有关,但如果只知道当地气流的状况而不知其上游气流情况,就无法预知当地昆虫如何迁飞;而如果不能及时掌握气流的瞬时动态,即气流信息,也就无法控制昆虫。在 20 世纪 30~40 年代广泛利用探空气球,是取得高空风速、风向信息的手段。在近几十年发展起来的现代信息技术是一种十分广泛的高新技术领域,主要包括获取信息的感测与识别技术、传递信息的通信与存储技术、处理和再生信息的计算与智能、施用信息的控制与显示技术以及面向实际系统集成的信息系统工程等五大类型。在这里面,微电子技术是信息技术的基础,计算机技术和通信技术是信息技术的支柱,而计算机技术和通信技术的融合则构成了未来信息技术发展的核心和方向。生态控制对信息技术的依托,一方面依赖于已经建立起来的相关部门的信息系统资料,尤其是即时资料。由气象中心了解全球气象要素天气形势信息,以取得气象生态动力源的大量信息;由水文中心了解到东北地区松花江、辽河流域河流流量、水位等信息;由抗旱防汛指挥部了解到各大中小水库蓄水库容、农田干旱、洪涝信息,以取得水文生态动力源的大量信息;由地理信息中心了解区域

内地貌、水文地质、海岸滩涂、海岛、高山、丘陵等自然条件下和人为开发条件下的地理动态,以取得地理生态动力源的大量信息;由林业、农业、水产、卫生部门了解区域内森林、草原、农作物、病虫害、渔业及疾病卫生动态,以取得生物生态动力源的大量信息。生态控制系统则是建立在上述信息及其他有关信息基础上的综合性信息系统,利用生态控制原理和相应的软件加以分析、综合。为实现这一目标,最好在政府及有关部门支持下,实施一系列试验计划。如在陆地生态系统与碳循环(Schimel, D. S. 1995)等多项研究基础上,于近年运行的美国长期通量观测网计划,将长期连续监测北美主要陆地生物群落中CO₂的生态系统净通量。Wofsy, S. C. 和 Holliher, D. Y. 在 2002 年通过因特网对此作了介绍。

二、生物技术与生态控制

生物技术又称生物工程,是利用生物有机体(从微生物到高等动植物)或其组成部分(包含器官、组织、细胞和细胞器等)开发新产品或新工艺的一种高新技术体系。在世界各国高度重视高新技术的今天,现代生物技术被视为 21 世纪高新技术集群中的佼佼者。那么,生物技术为什么能成为生态控制的依托呢?其根本的原因在于基因与环境的统一协调关系上。就拿高产品种的培育和应用推广来说,都与生态条件控制有关。如在《生态动力学》第十二章所述的玉米生态育种,甘蔗品种杂交,尤其是品种的利用,离不开生态控制。比如我国已取得二系法杂交水稻,现已有十多个新组合开始大面积推广,而推广地域的合理选择,需要生态控制技术,才能达到“两高一优”的目的。据预测到 2030 年前后,利用现代生物技术改造传统农业和牧业的工作将进入全面实施阶段。相信,届时生态控制原理大有用武之地,因此生态控制也必将生物技术视为它的主要技术依托之一。

三、太阳能、新材料技术与生态控制

太阳能是一级生态动力源。科学利用太阳能以供给植物类生态动力汇,是生态优化控制的直接目的。太阳能的热利用技术是将太阳辐射转换为热能,然后再加以利用的技术,可分为热的直接利用和把热转换成其他形式能两种方式。这些为生物含生态实验设施提供了适宜的人工控制的生态环境。太阳灶、太阳房、太阳能干燥器等已形成产业。我国农村在长期生产经验中,创造性利用太阳能的日光温室是主要利用太阳辐射为生物创造优良生境的一种经济有效措施(详见《生态动力学》第十二章)。这种生态控制手段的成功与否,很大程度上取决于塑料薄膜的质量。在 20 世纪 80 年代以前,所用薄膜材料质量不好,在日光温室内易形成水滴,使大棚内水汽较多,湿度大,适宜霜霉病真菌孢子生长。而后来上市的无滴膜,要比有滴膜优越得多。各种无滴膜质量的提高,适应了日光温室的大发展,证明这种温室是以新材料合理利用太阳能的人工控制环境方面的一种有力措施。

四、自动化、机器智能与生态控制

自动化技术是当代发展迅速、应用广泛、最引人注目的高新技术之一。所谓自动化技术,是各种自动装置系统的制造及其设计、使用的方法、技能的总称。它可将人从直接从事检测、操作、控制、管理等劳务中解放出来,对于减轻人的劳动强度、扩展人的器官功

能、提高工作效率、降低研究成本、提高控制精度和速度以及完成在各种极限环境中人力不能胜任的工作等,均具有重要意义。上述各种功能,对于生态控制,大都直接或间接有用。对于生态动力源与汇的线条识别和二维图形识别,已经应用于农业生态和地学方面生态动力源的。这实际上是利用机器视觉原理处理复杂的生态控制问题的一种自动化手段。随着生态控制的原理和技术发展,人工智能方面的技术应用前景当可更加广阔。

五、卫星遥感与生态控制

遥感的优势在于能从不同尺度上进行对地面观测。生态动力源研究的对象,分为生物或非生物两大类。由于植物群落是生态系统的主要组成部分,所以生态系统分类主要是对植物的分类。自 1972 年美国地球资源卫星发射成功以来,Landsat 系列卫星,至 1999 年已发射了 Landsat7。其他像气象卫星、SPOT 系列卫星,在生态控制中也都有重要作用,它们有不同的地面分辨能力,气象卫星 1.1km,Landsat 6 是 30m,SPOT5 达 10m (Campell,1996);而近年发射的小卫星 Konos 达 1m。由于卫星监测精度的提高,用它可获取许多其他仪器无法获取的信息,所以在生态控制中有多方面应用。主要有:大尺度遥感应用,促进了宏观全球生态的发展,可把地球各圈,诸如生物圈、大气圈、水圈、岩石圈作为整体,进行长时间多学科研究;与地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)结合,提高了生态遥感有效性和定量化水平;许多高分辨率的商用小卫星的发射运行,使大尺度生态学研究有了适用的工具和更大的选择余地;生态问题有较强的地域性,诸如我国现存的荒漠化、湖泊富营养化、内陆湖泊干涸、酸雨危害地域扩展、森林过伐、草原退化、湿地萎缩等现象,用卫星遥感分析研究其生态功能变化最为合适;农作物遥感估产、监测大气污染空间分布及影响程度、监测洪水、旱灾、火灾、土壤侵蚀、赤潮、战争所至生态破坏等。这些动态信息为人们控制生态系统提供不可或缺的图像。

六、海洋技术与生态控制

海洋是十分复杂的环境综合体,它包括了覆盖在海底岩石圈上的大陆架、大陆坡、大洋盆和海沟四种地形区域以及平均厚度为 3800m 的海水层、海面上的大气圈、海洋生物圈等。这决定了海洋探测必须用高新技术。所获资料,可用于生态控制,而经过生态控制方法得出的结果有利于海洋生物资源的开发,使海洋农牧化,真正实现“千顷海面变田庄”,为人类提供丰富的水产,满足人类对食物、药物和工业原料的需求,与此同时还要不破坏海洋的生态环境,促进可持续发展。

第四节 生态控制的时空尺度

由于生态控制涉及机械、物理(含热力、电、光、声、原子物理)、化学、生物以及社会(人类参与)等多种运动形式,而不同运动形式的时间、空间尺度差异较大。

一、时间尺度

1. 超短期尺度

该尺度指(0,12h]区间内的时段。也就是指在很短时间内完成的生态控制,从发生、发展到结束,整个生态控制过程不超过 12 小时,我们称之为超短期或短时的生态控制过

程,大概相当于美国 nowcasting(短时预报)的时段长度。这种突变性质的过程,诸如山崩、泥石流、雷电、冰雹、洪水、飑、龙卷风、地震、蝗虫暴发等非生物或生物的生态动力源对生态动力汇(人、动物、植物)的突然袭击,这种袭击往往是灾害性的,而采取人为措施进行生态控制,则有可能减轻灾害。如1988年10月4日在辽宁西部与河北交界地带,正值塑料大棚下蔬菜生长季节,突然下了一场冰雹,有所准备的农户,没有受到损失。然而,大多数农户没有准备,使大棚和蔬菜遭受严重损害。由于现代科学技术发展,对某些突发灾害可以进行 nowcasting,如用雷达的 RHI 和 PPI 显示可观测到雹云移动方向与速度,使生态预报精度随着气象预报精度提高而提高。把这种时间尺度列为一种控制尺度并加以研究,是必要的。试想若没有短时预报的多年研究,也就不会有今天的 nowcasting,可见借鉴天气学的 nowcasting,从现在开始针对超短期尺度问题开展研究,有望在十几年后形成生态方面的 nowcasting 及相应的 cybernetics 系统。

2. 短期尺度

这种尺度的时间范围指(12h,2d]区间内的时段。该时段的生态控制是人们比较熟悉的。尤其是这样时段的预测为生态控制提供了较可靠的科学依据。如人们熟知的天气预报,可了解未来两天是否有雨,未来12~48h内是否有明显降温,还有海浪状况等。因为目前的科学发展水平,已使一些地学方面生态动力源的预报达到可信的精确度,所以人们可以在基本相信预报结果的前提下,作出调节、管理和控制生态方面的决策。进一步来说,近些年发展起来的生态动力预报则是生态控制的直接依据。因为这些预报同时考虑到生态动力源汇关系。

3. 中期尺度

这种尺度的时间范围指(48h,10d]区间内的时段。该时间尺度对生态建设方面的生态控制,尤其是对于农林牧渔业生产中的生态控制是重要的。因为,一方面生产者可依据未来2~10d的生态预报来安排生产,实施有利于生物生长发育,防御灾害的准备工作;另一方面,这样的预报,有一定的准确率。与中期尺度相比较,短期乃至超短期预报虽然准确率较高,但对1~2d内调节、控制措施,时间段显得短些,以致无法实施;而长期预报准确率较差,难以作出较准确的生态控制。利用中期尺度的生态控制,取得经济和社会效益的例子不胜枚举。只是在以往多年,实践者未有从原理上认识到那是一种生态控制罢了。同其他学科形成的原理一样,生态控制原理也亟待把多年积累的丰富实践经验加以总结与提炼,这符合格物致知的原则。在农业上,大田作物的适时适作,如春播之前,测定并预报未来2~10d内的温度、墒情、降水、霜冻等,来调节播种期,就是从时间上控制人工措施,使种子得到最适宜的生态环境的优化控制,以达到一次播种保全苗之目的。在林业上,为飞播造林提供待造林山区的降水、土壤墒情状况的中期预报,可达到雨前飞播种籽,雨后出苗的最优生态控制目标,在《生态动力学》一书中,已有关于这方面经济效益的计算方法。

4. 中—长期尺度

该尺度指区间(10d,30d]内的时段长度。这种尺度的生态控制,目前还不能只以生态动力源的预报为主要依据。因为关于森林、海洋、牧场、沙漠等条件下的10~30d预报,尤其是生态动力预报,至今仍处于探索阶段。所以这个时间尺度的生态控制,应本着既考虑预报又不完全相信预报的原则,用运筹控制、随机控制的方法作出相对优化的决策。比如,用 Марков 决策的有限阶段模型,以20~30d为一个运筹周期,并把一个周期

分为几个阶段,通过转移概率及有关模型的计算,作出最优效果的生态控制决策。像小麦冬灌决策、苗圃防风措施决策、地膜覆盖与揭膜时间决策、人工控制环境内真菌孢子防御阶段决策等。

5. 长期尺度

该尺度指区间(30d, 1a]内的时段长度。在对生态动力源预报科学水平不太了解情形下,一些应用者曾盲目地以预报为依据对生态控制作出不合理的决策。这是他们对“长期预报尚在探索”这一事实认识不足所致。在以往,特别是几十年前有依赖长期预报进行种植品种的决策。比如,在我国中原地区的某些地理条件下,在早年种植谷子,非早年种植玉米,可获得好收成。于是有些人把收成好坏寄望在年度长期预报上,即在年初,如果预报当年为早年,则多种谷子,如果预报为非早年,则多种玉米。这种所谓的生态控制决策,是建立在没有过关的长期旱涝预报基础上的主观决策,即使获得了好收成,也是偶然,仍不可采用;除非将来长期预报准确率达到中期预报的水平。

6. 超长期预报

该尺度区间下限为 1a, 上限没有明确时限的时段尺度,即凡 1a 以上的生态控制问题,都列为该尺度。其实陆地和海洋生态系统有许多是超长期的。如多年生草本植物的生态控制周期有 2a, 也有 2a 以上的。至于树木,则有十年、百年甚至千年数量级的生命周期。超长期生态控制,也涉及到土壤、水分、气候等方面的生态动力源,还有人工生态动力源。超长期控制是建立在对控制对象多年研究基础上的措施。如森林采伐控制、退耕还林还草、休渔、休牧等,都建立在超长期科学优化基础上。但也必须注意,如有人依“今后数百年气候将变暖”的预测,推测在北半球农作物北界将北移。其实,这只是正探索阶段的推测,不能作为生产决策的依据。农作物北界的北移,不单单是气候变暖的作用,也有品种、基因的因素。

以上所述各种时间尺度,是互相联系着的,为了研究和应用的需要而划分。在运用时,须考虑各种尺度的精度,结合应用。一般说来,带有预测性的控制,总是时间越短,精度越高。像农业用的存储与放水的决策,总是要兼顾防洪兴利。从长期考虑是粗的,比如汛期前一个月得到汛期雨多的预报,不可轻易依此预报大量放水,否则一旦降雨量少满足不了灌溉需水,而在汛期当得知未来 1~2d 有暴雨时,则应着重考虑立即放水。因为 1~2d 的预报,一般较准确。至于更具体的控制措施,应依据生态控制原理。

二、空间范围

空间与时间有着千丝万缕的关联。从上节所述生态控制的时间尺度,不难推想,它的空间范围,从小到大,有着不同的层次范围和尺度。与时间短、中、长期这样尺度不同的是,空间应是三度空间或曰三维空间,有水平面上的,也有垂直方向的,有地球表面之上的,也有地球表面之下的,如海水中的生态控制范围。为了研究和应用方便,分为如下几种空间范围。

1. 微型空间范围

该空间范围微小,如果按三度空间直角坐标考虑,其垂直高度(或深度、厚度)不超过 2m,如果以陆地表面作为 X-Y 平面向上考虑,相当于大气的近地面层之内;其水平范围不超过 100m×100m,并且在每个方向上长度不超过 100m。这样的空间范围,可用以研究蜂房、小型人工气候室、温室及其中育苗小区。因为没有下限的限制,甚至可用于考虑

蚁穴这么小的生态环境,对于水平尺度,可用于研究水库上层水内的水生生物的生态控制问题等等。微型空间虽小,但从某种需要出发,生态控制的研究,实验上早已有之,如德国 Geiger 早年对近地面气候的全面研究,构成了近地面小气候生态控制的物理基础。

2. 小型空间范围

该空间范围较小,但一般比微型空间范围大,甚至大得多,其垂直高度(或深、厚度)在空间(0m, 1000m)的范围内,如果以陆地表现作为 X-Y 平面向上考虑,相当于大气边界层的垂直范围;其水平范围,以水平面上的面积区间表示,则为(100m×100m, 10000m×10000m),并且在每个长度方向上,长度不超过 10000m。在垂直方向,地表面之上,它相当于大气边界层的范围,所以人们熟知的边界气象学(boundary layer meteorology)的多年研究成果构成了该层气象生态控制的大气物理学基础,并且由于边界层气象学的研究,与上层大气研究不同,往往涉及该层内的地貌、地势、植被、种群以及该层之下的近地面土壤,边界层气象往往结合各种其他生态动力因子,所以它对于该层范围内以及上层土壤的生态问题,都有直接影响,以致对该层整体生态控制都有意义。该空间范围的生态经济意义很重要。因为农业、林业、牧业、渔业等多项生产活动都在该层次内进行,即使更大范围的生态,也一般离不开小范围的人类活动,因此在其范围内的生态控制可视为相应经济控制的一个组成部分。

3. 中尺度空间范围

该空间范围,在垂直方向约 10km,一般限于从地面到对流层顶,它与以上两层次有重迭的高度,其上限可以变化,在地面之下仍限于 1000m 之内;在水平方向,在区间(10km×10km, 100km×100km)的每个方向上,长度不超过 100km。该范围一般包括了人类活动各个层次的生态控制问题。在地面之上,对流层是大气运动的大尺度范围,各种有益于生物或有害于生物的天气现象,如暴雨、大风、冰冻、雪等形成于该层,并且是大范围旱涝等灾害的根源,而从地面到高山,从地面到海拔数千米的高度上,有不同植被、动物和人类活动。该范围构成了生物生存的主要空间。但在水平面上,一些中尺度现象的出现是有距离限制的。比如说,由于地方性天气或地形、植被的作用而形成的地方性雷雨冰雹,在邻近 100km 左右的地方可能没有。这种的中尺度特征,会为相邻数百千米的地域构成不同的中尺度生态环境,以致有中尺度生态控制范围的存在。

4. 大尺度空间范围

对于这类空间范围,一般不能给出水平面上的准确尺度,通常是以大陆尺度加以区分的。比如亚洲大陆、非洲大陆等。而垂直范围,在地面之下可达深海、大洋之底,在地面之上,可超出对流层。这个范围的生态控制以大陆内或大洋内的各种生态环境的综合控制和宏观控制为目标。关于这类控制,多年来曾有人提出设想,如幻想人类有能力时,可对北冰洋海水进行控制,以改变大范围的气候,在现代,许多想法是不可能实现的。一般只能是通过一个个局部地区的生态控制,来促进大范围生态环境的改善,如在 20 世纪 40 年代前苏联设计的“斯大林改造自然计划”,我国营造的“三北防护林”等等。

5. 全球空间范围

顾名思义,全球空间范围的生态控制,是以整个地球为生态控制对象的。近几十年来,全球生态控制,实际上已提到国际关系研讨的日程。因为许多国家政府和人民群众,都已清楚认识到,全人类共同拥有一个地球。如果全球生态环境受损,则直接危害世界各国人民的生存,并贻害子孙后代。工业革命以来,排放到大气中的二氧化碳等气体增

加,造成大气圈肥沃化(atmospheric fertilization),经过多年采样研究,人们逐渐认识到这要严重威胁生命环境,此乃全球公害,因为全世界只拥有一个大气圈,而地球上任何向空气中排放的污染物,都能加速大气圈肥沃化,也就增加对人类环境的危害。为了控制这种现象,许多国家都由政府环境保证限定烟尘排放。在国际上,前几年签署了联合国气候框架公约,各履约国共同控制大气肥沃化,以优化大气环境,减轻 CO₂ 等温室气体对人类的危害。令生态工作者欣慰的是,由于社会各界对全球生态的重视,近年这方面研究成果与日俱增。1994 年创刊 *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*(可持续发展与全球生态学国际杂志)以来,这方面的许多有益的论文,诸如栽培方式影响农业可持续发展方法论,可持续农业多重标准分析等,对生态控制极有参考价值。

6. 宇宙空间范围

1957 年,前苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星 Слутник-1,这标志着人类征服宇宙空间的开始。多年来,随着航天科学发展,已有数千颗人造天体进入宇宙空间,其中有许多技术给人类带来恩惠。太空育种的成功实施,是通过人类活动生态动力源,利用卫星、宇宙飞船(如我国 2002 年春完成的“神舟三号”宇宙飞船试验和 2003 年“神舟五号”载人飞船)将有关生物材料送上太空,利用太空特有的生态环境,培育出优良作物种子的有益实践。这就给生态工作者提供超出地球的宇宙空间的生态控制范围,也为生态工作者今后研究宇宙空间生态动力学,提供了个崭新的“用武之地”。当然,这项工作目前主要由搞育种的宇宙生物学家来进行。但预计宇宙生态控制,随着航天事业发展会引起社会重视。

第五节 生态控制系统复杂性、开放性与相对封闭性

本节,在复杂巨系统和钱学森有关论述指导下,试论生态控制系统的复杂性、开放性与相对封闭性。

一、复杂性

关于对生态控制复杂性研究及其认识,都应建立在整个科学发展阶段的基础之上。因为只有理解现代科学之复杂,才有可能认识复杂的生态控制原理。而背离对生态动力复杂性的充分认识,就会以常规的观点停留在以往经验的位置上,以简单的思维逻辑作复杂生态控制的决策,以致出现“依长期预报决策作物种植种类或品种”、“依长期预报决策水库放水还是储水”这样一类无科学依据的决策。为避免决策失误,要从复杂性原理上认识,并要通观生态控制的合理机制,是必须的。

半个多世纪,科学发展表明,我们正处在科学史上一个大转折时代。从经典的机械论科学向新兴科学的转变,或者按 Prigogine 的说法,是从简单性科学向复杂性科学的转变。复杂性研究的每一次进展,无不伴有生态控制复杂性的认识。在这种认识中,传统的方式和手段已不能再满足客观的需要,以致人们被迫以“整体”和“系统”概念来处理生态方面的复杂性问题。对于复杂系统,不能期盼有一种理论可以达到牛顿力学那样的简单性和精确性。在未有考虑到生态复杂性之前,人们往往把生态控制想象得很简单。这实质上是没有从生态动力源-汇关系上认识生态控制系统的后果。比如对农业害虫的

认识,在相当长一段时期性,忽略了迁飞的影响,像在黏虫的预报和控制上,立足于简单性思维,只考虑当地的虫源、土壤、气候、水文等条件;有人考虑可能有迁飞,但无根据。后来经过长时间试验研究,证实了迁飞,掌握了规律,这是从复杂性考虑的结果。事实上,黏虫运动的生态动力源涉及的问题是异常复杂的,以致为研究这种似乎单一的生态动力规律及其控制手段,动用了气象学、水文学、土壤学、栽培学、航空技术、航天遥感等多方面的科技人员共同攻关。所用方法一改以往的简单描述,而动用多种现代数学方法和计算工具。事实上,已经是采取综合集成手段来处理这个具体的复杂生态控制问题了。

以上只就一个常见的生态问题谈及其复杂性,而实际问题比那要复杂得多。这主要是许多生态动力源和汇本身就具有复杂性的特点,并且它们之间还有着复杂的联系。而其中关系错综,往往是非线性的。所以,用像经典力学或经典数学,以确定性方法解决具有随机振荡性问题的方式,是不可取的。事实上,生态控制在一切层次上都会遇到复杂性,结束现实世界尚存的“生态控制简单性”这一传统观念的基本思路和首选做法为:提倡把“生态控制复杂性”当作“生态控制复杂性”来处理,借助复杂性科学方法,建立现代生态控制体系。钱学森曾说,解决开放的复杂巨系统问题,就连现代每秒几亿次的计算机,以至每秒万亿次的计算机都不够用。我们必须动脑筋,千方百计使计算量控制到机器能力之内。在具体操作上,以耗散结构为基本概念,耗散旧的简单性认识的质,补充新的复杂性认识的质。论证在远离平衡态的条件下,生态控制系统由于出现耗散结构而形成的“最低限度的复杂性”,为进化到处理真正复杂性提供依据。当然,对于生态控制复杂性的精确定义,目前还是不可能给出的。但是,处理复杂问题的 AN(自动机网络)方法,对于包括生态控制复杂性在内的一切复杂性问题,有比较现实的意义。正如 1993 年钱学森致戴汝为的信中说:“在面对一个开放的复杂巨系统,若是专家们还不熟悉,对其整体客观行为毫无把握,那么 AN 方法不失为一得之见”。

二、开放性

对于生态控制系统的开放性的认识,在 20 世纪,随着科学发展和人类认识客观世界的各个专门学科的渗透,已有长足进展。生态控制的复杂程度,在很大程度上起源于系统的开放性。试想,如果没有人类历史上多年来生态系统的开放,许多生物物种和品种只被认为只适应于原产地的生态条件,不与外界交流,像今天这么多样的生物处于不同环境中的势态,该是无法想象的。

系统开放的方式和程度,系统与环境相互作用的方式,都直接影响或规定着系统的复杂性。Prigogine 等强调开放性是自组织产生和维持的必要条件,对于简单系统,可以用控制参量的变化来描述。而对复杂系统却很难这样做。生态县建设某一阶段完成后,同该阶段之前相比,差别总是很大的。这些实际差别的存在,来源于对开放性的认识。生态县建设得如何,一般表现出对生态控制的开放性认识的深度及其实践,这实际上是对 Carl Hewitt 等 1991 年提出的“开放系统科学”(open system science)观点的印证。

从开放的复杂巨系统概念(1989 年由钱学森提出)看,在目前认识水平下,主要含 6 种系统:宇宙系统、地理系统、生物圈系统、社会系统、人体系统和大脑系统,它们之间有着固定的嵌套关系。生态控制系统可视为生物圈系统中的一个子系统。就以沿海的一个生态县来说,它虽然只是生态控制系统中一只“麻雀”,但却“五脏俱全”,联系着偌大的

复杂巨系统的各个方面。该生态县内具有生物多样性的基本特征,有海洋生物,近海滩涂养虾、贝等,在平原地区以种植水稻、油菜为主,山区有森林树木,还有药用植物、食用微生物,也有动物……这些均属于生物圈。关于经典的复杂巨系统的嵌套关系,如图 1-1 所示。

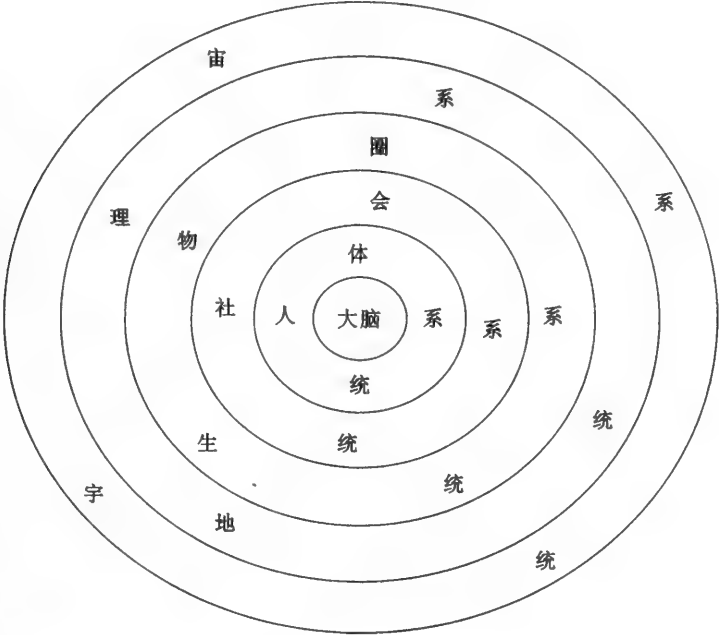


图 1-1 复杂巨系统的嵌套关系

在生物圈内,一些生物可视为另一些生物的生态动力源。在生物圈系统的外圈,并与生物圈系统最靠近的是地理系统,确切地说,应叫地学系统,因为它不只含有地球科学概念中的地理概念,而且含有地理学以外的但属于地球科学范畴的气象、海洋、水文、土壤、地质等概念。生态控制系统对于地球科学系统,显然是开放的。因为地球科学系统中,要素虽是非生物性质的,但它们中的绝大多数要素均构成生态控制系统的直接生态动力源,从生态系统的总体出发,它们均为二级生态动力源,比如,地球大气温度,这种气象类生态动力源是植物生长发育不可缺少的,也是人和动物生存的必要环境条件,众所周知,地球以外的其他星球,没有生命,温度昼夜变幅达数百摄氏度。作为气象和水文类公共的生态动力源降水与蒸发,它为生物生存提供必要的水分条件,水循环也是生物赖以生存的热量平衡的重要条件。地貌类生态动力源可直接作用于动植物和人体。岩石圈中近地面的上层土壤,是高等植物生存的基础条件之一。地壳活动导致的地震等灾害可突发性地破坏人类生存环境。并且不受地学系统直接影响的封闭生态控制系统是很少的,即使有也往往是人类干预所致,并间接地对地学系统开放。宇宙系统是隔着地理系统向着生态系统开放的。但从本质上来说,这种开放性的意义和作用,不亚于地学系统。因为从生态动力学基本原理可知(详见裴铁璠等著《生态动力学》第七章):属于宇宙系统银河系中太阳系的中心——太阳——是地球生态系统的一级生态动力源,它通过地球系统把光和热供给地球生物,并与大气圈、岩石圈、水圈作用形成了各种不同的生物环境,所以说生态控制系统对于宇宙系统也是开放的,当然如图所示,中间经过一个地学系统(相当于钱学森所说的地理系统),这从一个侧面说明生态系统开放性符合复杂巨系统

的嵌套关系。又如,月球,也是宇宙系统中的一员,它与地球、太阳位置关系的变化规律所形成的月相影响潮汐,而潮汐动态作用于海洋水生生物形成海洋生态动力源(见《生态动力学》第十六章),这表明生态控制系统对于宇宙系统中的月球是开放的,而中间经由海洋(可视为地学系统的一部分),也符合钱学森所指出的复杂巨系统的嵌套关系。

从生物圈系统向里观察,与其邻近是社会系统,生态控制系统对社会系统的开放性系指所处生态环境,受人类活动的影响,而人类活动受社会制约,那些给生态系统带来重大灾难的非正常的生态控制,常常后患无穷。例如,新疆古代战争破坏了绿洲,加速沙漠化;日本侵略我国东北期间,对东北天然森林的肆无忌惮地砍伐;在清朝时期,为建造承德避暑山庄,对原热河地区森林的砍伐等等。在国外,大面积盲目垦荒引起黑风暴等等。这些都是军事、政治和不合理的经济政策所导致的破坏性结局,生态控制正面事例也很多。可见生态控制对于社会系统是直接开放的,并符合复杂的巨系统的嵌套规律。由社会系统再向内,是人体系统,人体系统是设计和实践生态控制所必须的,它是在社会系统联系之下,对生态系统开放的。比如,人们植树造林,像我国三北防护林建设,是使生态动力朝增优方向发展的生态控制,而这种人类活动总是受社会活动的驱使,一般是有组织的人类活动,当然这属于人类活动生态动力源。下一个层次是人的大脑,它虽然与生态控制没有直接关系,但有其间接关系。因为大脑是指挥人体系统的中枢部分,包括生态控制行动在内的人类活动生态动力源,必然受大脑的支配。大脑在控制生态方面的作用,一个重要的表现是近些年形成的人工智能,它用机器代替大脑进行控制工作,可以完成大脑不易完成的许多控制,以实现脑力劳动自动化。这方面,我们在《生态动力学》一书中有叙述,本书将作为一章全面论述生态控制智能化。值得注意的是,无论机器智能再大,也是人们设计出来的,所以在生态控制中处于核心依然是大脑。正如华罗庚所说:“我们要做电子计算机的主人,不做它的奴隶。”

三、相对封闭性

相对封闭的生态控制系统是存在的,诸如自然保护区,像作者熟悉的长白山自然保护区,还有大连老铁山自然保护区以及蛇岛等。但是这些地方,并非世外桃源,而事实上,仍以地学系统和生物系统作为其直接生态动力源,并且也脱离不开宇宙系统中太阳这一基础生态动力源。而人们把它确定为自然保护区这一行动,是社会系统的。对其保护是通过人体实现的,而人体行动是在大脑系统指令下进行的,所以自然形成的封闭生态系统的控制,其封闭性是相对的,而开放性是绝对的。对于人工设计并建造的相对封闭系统,诸如人工气候室、畜舍、禽舍、温室等,也仿自然的封闭系统加以说明,此不赘述。

四、生态复杂巨系统的可持续发展

生态系统复杂性,给人类控制生态环境实现可持续发展带来许多困难,使得“人类与自然相互协调以求共同生存”(李星学等,2002)这一理想难以如愿以偿。在可持续发展需求下,人类生态位的正态分布(晏磊,1998)必须作相应的主动控制,从密生态位滑移到空生态位,即人类获取自然资源的范围、数量必须相对于其他生物种类生态位加以调整,避免资源获取中的过度竞争。应当始终以综合集成方法论处理可持续发展中的生态复杂性问题。近年,在恢复生态学方面有人提倡的“生态系统的组装与集成技术”(章家恩等,1999),可视为综合集成方法论的一个侧面。

第六节 科学价值和实用领域

我们在第三节曾经论述了生态控制原理的科学基础,也就是赖以形成的基础学科的问题。反之,生态控制原理将丰富自然科学许多应用基础学科的内容,这即是它的科学价值;与此同时,生态控制原理的形成,将通过结合实际的试验、中试直到推广,用于农业、林业、渔业、环境保护、医药卫生、海洋开发、减轻自然灾害等多种国民经济领域。

一、科学价值

生态控制原理,从学科分类上,无疑隶属于生物学科。而在生物学科的基础分支学科兼控制论的基础学科中,人们早已知道有 20 世纪 50 年代创建的生物控制论。但生物控制论仍是一个大学科,最近又有人提出生物进化控制论等分支,但其中涉及生物环境控制内容甚少,不能满足生态科学发展的需要。将来创建自成体系的“生态控制论”学科,生态控制原理可能成为其雏形阶段原理依据之一。因为当今时代,与大约半个世纪前初创生物控制论的时代不同。当时的控制论是经典的控制论,而现在的控制论已发展到第三个里程碑阶段——大系统控制论阶段,并有钱学森提出的复杂巨系统理论,而生态控制原理则以复杂巨系统理论为指导。

对于许多早已形成的带有应用性质的基础学科,如森林生态学、农业生态学、昆虫生态学等,生态控制原理均可构成它们学科的部分基础,丰富各自学科的原理和方法。如森林生态学吸收生态控制原理的数学方法,可以定量地研究生态林的营造,可以预计并优化设计其减灾效果图。在农业生态学中,吸收生态控制原理的机理模式,可以调节田间生态环境。

对于生物科学和地球科学的许多边缘学科,诸如农业气象学、森林水文学、森林气象学、生物地理学等,生态控制原理可对生态动力源—汇合理调控方向,提出定量依据。比如,在水利工程设计中,生态工作者不是可有可无,而是代表生态方面的直接参与者。又如农业气象学中许多问题,可因生态控制原理的支持,理论依据更加充分。这些都会为地球科学的应用分支,提供有力的支持,提出更多的研究课题。

二、实用领域

生态控制原理的实用领域是很广泛的。随着社会生产的发展和人类生活水平的提高,其应用范围将越来越宽,应用人数将越来越多,应用效益会越来越大,应用水平将越来越高。

1. 在农业中的应用

任何农作物都在一定的环境空间里生长,生态控制原理正是运用现代科学基础为农业农作物控制优化空间的有效工具。从农田作物的结构调整、优化布局、茬口安排到作物关键生育期环境条件的调控都需要适宜于自然条件的生态控制方法,使农作物充分利用优良的气候、土壤、水文、地貌及生物环境。农田系统的生态控制是在自然条件下调节水肥、营养,优化利用种子的手段,依其科学定量方法,对营养、种子等生态动力源充分利用。在工厂化农业的生产条件下,生物利用的是相对封闭的控制系统,这样的系统从设计、建造到使用,整个过程都要考虑优化的问题。在防御自然灾害方面,利用生态控制原

理,可以设计出生物和非生物的优化预测、防治方案,据此可以尽量小的投入获得尽量大的防灾效果。

2. 在林业中的应用

无论对于天然林还是人工林,无论对于生态林还是经济林,生态控制原理均可从生态动力原理出发,为造林、营林、森林经理等人工干预的生态动力源,提供优化的控制设计方案。比如利用控制理论方法算出控制森林火险的最优方案和策略,用规划论控制方法对植树、飞播造林活动作出最优的动态规划。用排队论方法决策森林生态建设项目的先后,决策是否分期分批。用库存论方法决策林木砍伐更新。用对策论方法确定防灾以保护森林的效果。在农田、海岸堤防护林建设中,可用相应的生态机理模型遴选防风、护田、护岸林的设计方案。

3. 在渔业中的应用

关于水产的生态控制,无论是海洋捕捞,还是在内河、湖泊的养殖捕捞,均可以用生态的优化决策代替以往的一般的考察经济决策,使鱼苗的生态控制达到合理的水平。对于水库养鱼,则更易用现代生态控制理论,以微分方程求解的方法,得出最优捕捞策略,既保障生产不受影响又使库中鱼生长发育良好。

4. 在湿地改造利用中的应用

我国是个多湿地的国家,在不同地区的湿地,各有特点。如何加强湿地保护,拓宽湿地应用领域,在以往几十年中,定量分析、综合方法比较少,而有了生态控制的各种方法和手段,便可在机理模式与经验模式结合的前提下,给出合理的经济有效开发方案。比如用 Monte Carlo 方法进行模拟从主观概率出发模拟出客观概率的结果,使决策者优选开发方案时,胸中有数。

5. 在城市环境建设中的应用

随着城市化水平的提高,优化城市环境,增加城市绿地面积,为居民创造良好和谐、卫生整洁的现代化生活环境,成为城市建设的当务之急,有了优化的生态控制原理,则可有充分理由地论证改善城市的长远配套措施。对于我国许多新建的开发区的城市环境建设,利用生态控制原理更可使城市的百年大计建设确立在定量控制的科学基础之上。

三、科学价值和实用领域关系

生态控制原理的科学价值和实用领域是不可分割的。一般地说,它支撑和影响的学科越多,它渗透的分支学科越广,在实用中的领域就越宽阔,对社会和人类的生存环境就越有益。为能简明扼要地加以概括,我们可以给出这种关系的一幅简单框图(图 1-2)。当然,图中指出的只是主要的,实际上要多得多,还有不少领域是至今人们未认识到的。图中有箭头的实线指学科;虚线指向领域。

第七节 发展方向、前景展望及存在问题

生态控制原理须沿着选定的方向健康地向前发展,从社会需要和基础应用看,其发展前景当然是好的,但因学科交叉特点及社会认识方面的影响,该学科仍面临许多困难,这有待在不断前进中克服。

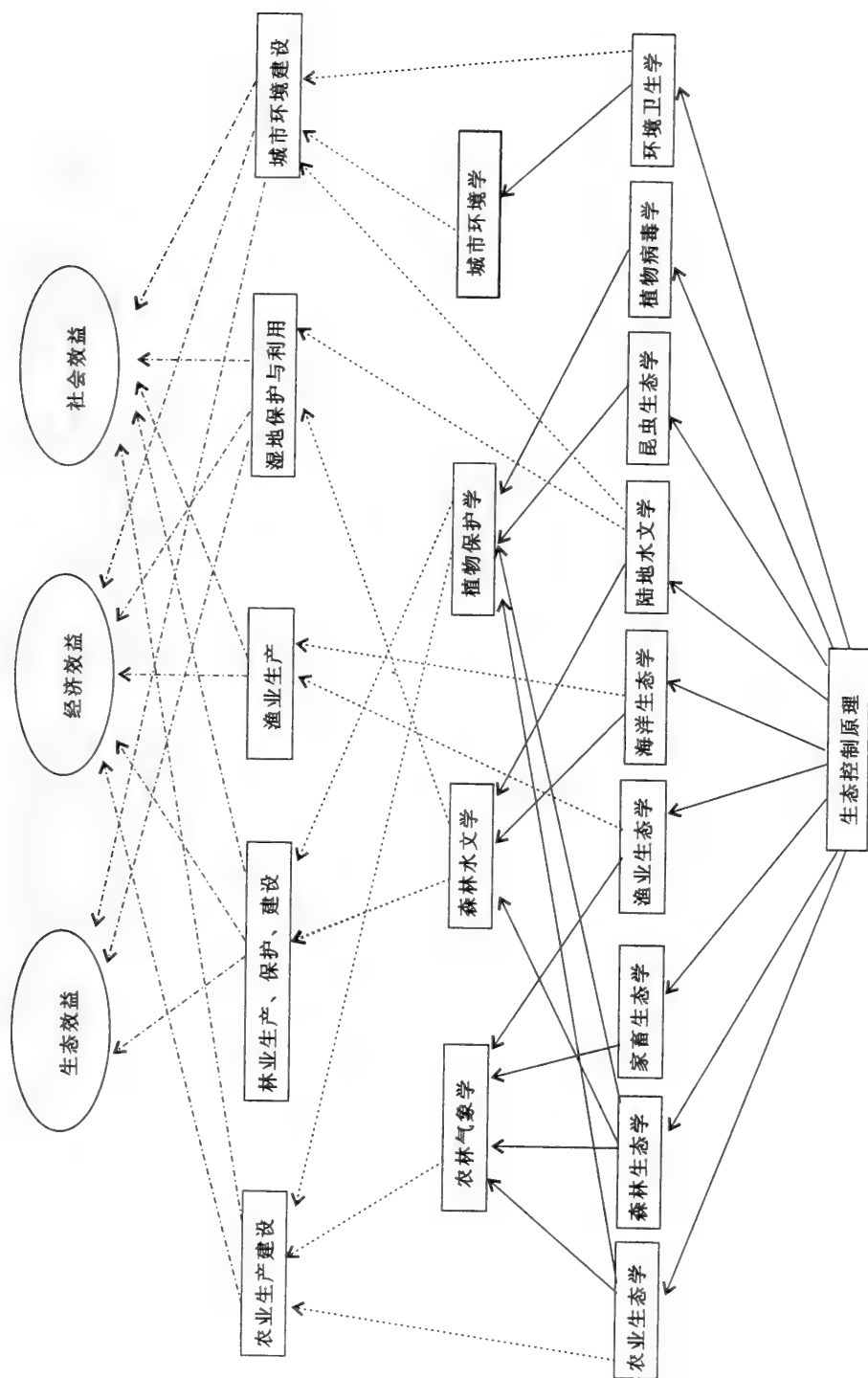


图1-2 生态控制原理支撑的学科和应用

一、发展方向

生态控制原理发展方向的认定,取决于应用基础学科的性质。从原理的建立来说,具有学科理论探索的意义,它有目标地为生态控制论学科体系的建设,准备有意义的材料。生态控制原理同时也是生态控制论的姊妹篇,以致两个学科相关密切,应携手并进,并在发展过程中,相互借鉴,相互补充。

从实践意义来说,生态控制原理每取得一项阶段性成果,在人们改造生态环境中都有直接应用。当然,每项应用,既不可急于求成,也不要因为某项成果暂时用不上或用得不尽人意,就立即放弃。在应用中,失败时找出失败的原因,再行改进;取得一两次成果,如无把握轻易不可大规模推广。

从研究方法来说,应注重学科交叉,从定性到定量,逐渐使其走向数学化、定量化。但是,对于绝大多数研究来说,实现上述目标并非轻而易举。不断深入学习钱学森院士处理复杂巨系统的综合集成方法论,这对本学科发展极为有益。一些具体研究方向,则可参照生态动力学科学方法论,不断调整具体方向,能尽快准确地把握住总方向。

二、前景展望

由于社会在进步,尤其是我国改革开放以来,科技进步,知识创新,不断受到政府和社会公众的支持,这是发展生态控制原理这门科学的大环境。

随着中国加入 WTO,各项建设的发展,对生态控制原理提出的具体问题越来越多;社会对该学科的要求也越来越高。尤其是科学界和全社会生态意识增强,发展农业、林业,特别是生态建设,诸如建设城市绿地、森林公园、自然保护区等,都离不开生态控制原理。因为目前人们对生态科学要求已超出上个世纪那样的环境评价,而是要生态科学工作者提出控制的手段和设计建议。此刻,如若仍用以前的做法,不但用户不满意,就是政府机关也通不过,不但要有好的生态环境,还要兼顾其他自然资源,总之要符合可持续发展的规律。

从研究人才来说,自 20 世纪 80 年代,我国生态学处于大发展阶段,20 多年来有计划地培养出来一批生态专门人才,包括高级人才,现在可以说遍布全国科研、大学、设计及服务部门。这些人才中,一般基础雄厚、视野开阔,对今后的生态控制原理的研究和应用,是极为有用的。就拿控制优化研究必备的基础数学和应用数学知识来说,在 20 年前的生态工作者中,基础够用的人大概不多,因为在 20 世纪 50~70 年代的高等教育中,生物学专业的学生,所学到的数学知识远不胜任研究控制问题。另一方面,20 多年的改革开放,使我国加强了国际交流,生态控制方面的国外动态,国内容易掌握,国内专家的论文也容易用英文在国外发表。而在 20 世纪 70 年代以前,我国生态学者在国外发表论文,并被收入 SCI 的,可以说是寥若晨星。

三、存在问题

生态控制研究,是跨学科性质的优化研究,所以需要的知识、设备和资金多而难以解决,以致提出的生态控制的建议,不易付诸实践。从社会公众和科技界的认识来说,原理研究,不像工农业技术、医药方剂等容易见效,而原理是一种应用基础。生态控制是作为基础农学、基础林学、基础医学的基础,如果没有长远的战略眼光,研究、中试到推广的整

个过程就难于实现。为此,应从科学意义多加宣传,以期引起政府和社会公众的重视与资助。

综观生态控制原理各个方面,读者可以看出,它的许多具体科学问题,在绪论这一章,基本上都涉及到了。这本书则是通过具体论证,回答这些问题。

随着人口增长和科学技术进步,人类活动越来越强烈地干扰环境,威胁着人类未来的生存与发展。为此提出人与自然相协调的可持续发展战略。人们在进行各项生产活动的同时,不但要进行环境评估,还要进一步做到生态控制。使人们确切地了解其活动对生态环境影响机理与程度,同时,还能进行生态控制。由此看来,生态控制原理不但是一门基础理论学科,同时具有广阔的应用前景。让生态科学及其相关科学工作者,共同努力,为人类创造美好的未来而工作。

参 考 文 献

- 王文华编. 2001. 钱学森实录. 成都:四川文艺出版社.
- 王寿云等. 1996. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科学技术出版社.
- 石青云. 2001. 石青云文集. 北京:北京大学出版社.
- 许国志主编. 2000. 系统科学. 上海:上海科学技术出版社.
- 李星学、王仁农. 2002. 还我大自然——地球敲响了警钟. 北京:清华大学出版社. 广州:暨南大学出版社.
- 晏 磊. 1998. 可持续发展基础——资源环境生态巨系统结构控制. 北京:华夏出版社.
- 徐冠华. 1992. 中国三北防护林地区森林及其他再生资源遥感综合调查及监测. 中国遥感进展, 195~200. 北京:万国学术出版社.
- 钱学森、于景元、戴汝为. 1990. 开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 14:1~11.
- 章家恩、徐 琪. 1999. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. 应用生态学报, 10:109~113.
- 裴铁璠等. 1999. 自然灾害非参数统计方法. 北京:科学出版社.
- 裴铁璠等. 2001. 生态动力学. 北京:科学出版社.
- Campbell, J. B. 1996. *Introduction to Remote Sensing*. New York: Guildford Press.
- Keeling, R. F., Piper, S. C. and Heimann, M. 1996. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381:218~332.
- Miranda, J. I. 2001. Multicriteria analysis applied to the sustainable agriculture problem. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 8:67~77.
- Panzieri, M. et al. 2002. A thermodynamic methodology to assess how different cultivation methods affect sustainability of agricultural system. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 9:1~8.
- Schimmel, D. S. 1995. Terrestrial eco-systems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1:77~91.
- Wiener, N. 1961. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* (2nd ed.). Cambridge, MA: The M. I. T. Press and John Wiley and Sons, Inc.
- Wofsy, C. 1996. Effects of interannual climate variability on the carbon dioxide exchange of a temperate deciduous forest. *Science*, 271:1572~1578.
- Wofsy, S. C. and Hollinger, D. Y. 2002. Introduction of Ameriflux. <http://diac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux/scif.htnn>.

第二章 生态控制的科学基础

数理、化学、地学以及生物学是现代生态控制的基础。其主要原理或其中的某些部分,都不同程度地支撑着生态控制的原理和应用。这些不仅体现在现代控制原理的建立、论证、计算与实际应用等方面,而且体现在科学方法论、思维逻辑方面的指导与借鉴作用。各门基础学科虽然说对生态控制原理,都有一定的支撑作用,但是它们所起作用不是等同的,作用的方式也不一样:有直接作用,也有间接作用;有互为因果作用,也有互相渗透作用;有应用工具作用,也有方法借鉴作用。数学科学在生态控制原理中的作用是最重要的,这是由生态控制原理的学科特点以及多学科支持所决定的(详见图 2-1)。

本章将首先论述数学科学对生态控制原理的意义、应用途径和效果等问题,然后用一定的文字和公式,说明其他学科的相应问题。

第一节 生态控制的数学基础

对生态学、生态过程的认识,尤其是定量认识,诸如生态过程动力学方程建立与求解、生态过程控制、生态建设设计和最优生态环境调节等均离不开数学,数学是生态控制原理的第一基础学科。

一、从科学发展上的认识

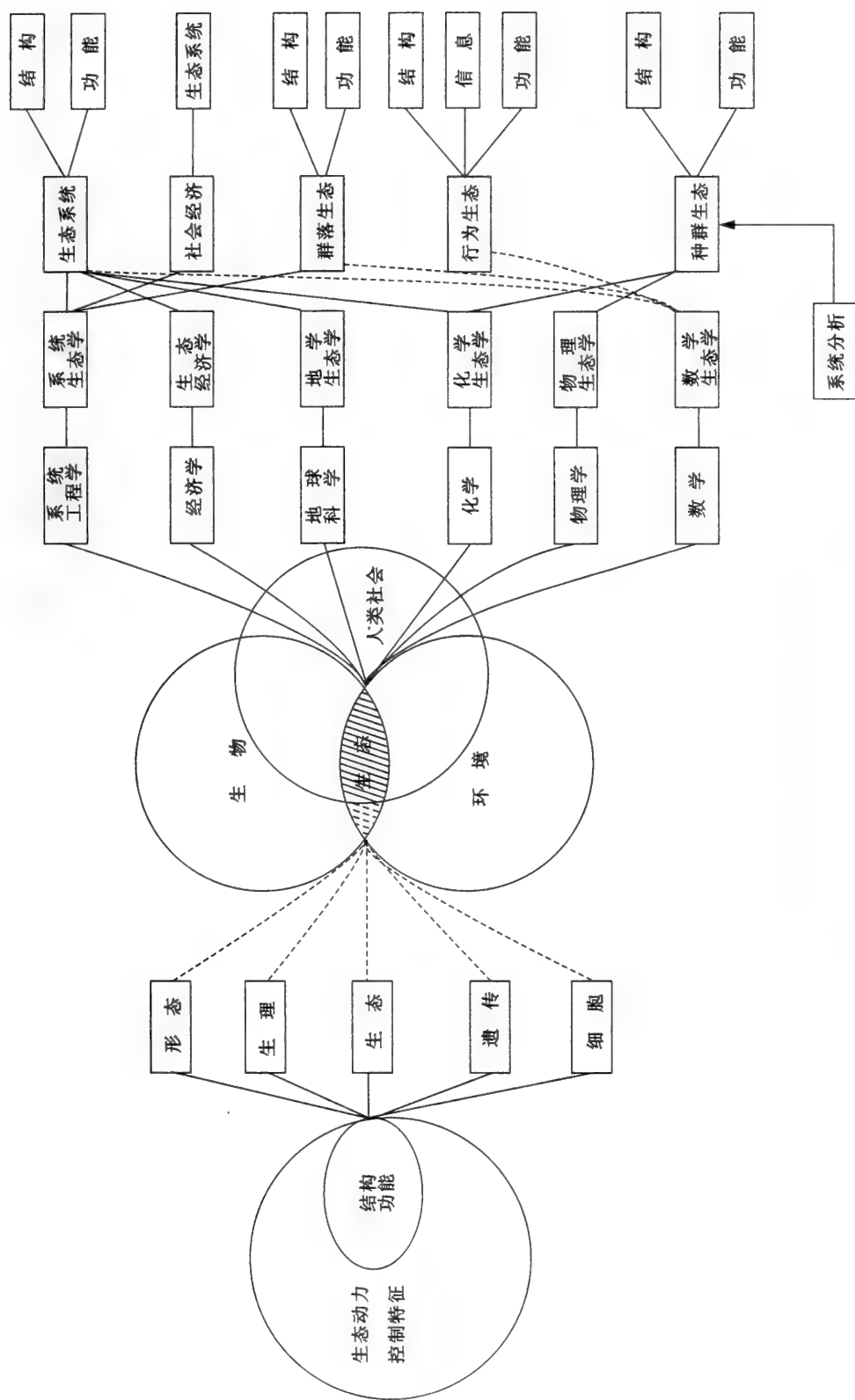
我们在本书中研究的题目只是整个生态学科中的一个具体的问题,当然也可视为控制论等学科在实用中的一个小小的侧面。对于整个自然科学,它不过是沧海之一粟。所以,要了解数学对生态控制的指导及基础工具、思维方法方面的作用,首先应了解并阐明我们对数学益于整个科学意义的认识。这就好比欲预知某一城市的天气,须了解大范围大气运动之动态——天气形势一样。

在古希腊学者争论“世界本原”这一大问题,不同学者有各自的主张。其中研究数学的毕达哥拉斯学派提出“万物皆数”的命题。对于该命题,哲学界原则上是否定的,尤其指出其将“数”神秘化以致错误地解释了世界本原。但绝大多数人,肯定其中的合理因素,即:客观世界数量关系的普遍性,世界上万事万物的统一性可以用数学形式加以描述。当时重视数学的思想,乃是今天人们认识到的数学之广泛适用性,尤其是 20 世纪科学数学化思想的萌芽。

据科学史家研究,我国从秦汉到宋代,数学都是很发达的(与当时国际水平相比),在数学指导思想上也是很进步的。但是,在 14 世纪到 19 世纪,西方数学发展了,我国则相对落后。对数学的哲学研究,几乎是空白。

自辩证唯物主义的哲学诞生以来,对数学才有了更精辟的论述。恩格斯说:“纯数学的对象是现实世界的空间形式和数量关系,所以是非常现实的材料”(《马克思恩格斯选集》第 3 卷第 77 页,人民出版社,1972)。

客观世界中各种事物千差万别,但它们无不具有质与量两个方面的属性,任何事物



都是质与量的统一体。只是为了研究问题的方便,人们才侧重研究事物的质或量的某一方面,才有所谓定性研究和定量研究之分。对客观世界物质运动形式进行质的研究,构成了科学分类的基础,从而有了自然科学与社会科学、思维科学之分。在自然科学内部又有了力学、物理学、化学、天文学和生物学之分。单纯地对现实世界一切事物的量的规定性进行研究,便是数学科学的任务。数学抛开客体的其他一切特性而只抽取各种事物的量、量的变化及量与量之间的关系。离开量的质是不存在的,只有对不同质的事物进行量的规定性的研究,才能更准确地把握事物的质,才能更精确地认识事物发展变化的规律性。不仅数学家、哲学家持以上的看法,许多其他方面的研究者也都对此深有体会。比如英国著名物理学家汤姆逊说:“如果不能用数学来表示,那么你的认识是不够的,不能令人满意的,可能只是初步的认识,在你的思想上,还没有上升到科学的阶段,不论你讲的是什么。”

数学发展的渊源在于存在于客观世界的物质的量的属性,在从感性认识上升到理性认识以致真正成为数学理论之后,再以数学理论为基础,为工具,为思维方法,去应用于其他各方面各学科的研究,是实现重大科学发现、技术发明的根本,尤其使研究者能捷足先登,作出具体的成绩。科学技术史上好多事例(比如相对论的创建、遗传密码规律的发现、DNA双螺旋结构的发现、数值天气预报方法的创造、CT机的研制成功等)都说明:同是研究一个科研课题,有人能“高人一招棋”,最先登上科学高峰,原因尽管很多,但能否巧妙地掌握和运用数学方法,乃是一个关键性环节。

关于数学在各个学科中的应用规律,许多有成就的研究者(不限于自然辩证法暨自然科学哲学专家)都有切身体会。其实,纯数学与应用数学之间并没有一条不可逾越的鸿沟。华罗庚院士早在1959年的一篇文章中就指出了这一点。对于应用数学的特点,关肇直院士曾一语道破地指出:“依据现实世界的已知规律,运用现代数学的方法,说明现实世界的新现象,或解决工程技术中的实际问题。”为了用数学解决实际问题,针对客观实体建立模型尤其重要,用数学方法建立模型也就是《生态动力学》一书中多次提过的数学模造(mathematical modelling)。人类生存的自然界,从微观的基本粒子到太阳系乃至银河系,从局地生物环境到整个生物圈,从微生物个体到大型动物种群,它们本身及其运动形态可统称为实体。科学的任务在于认识实体,描述实体,变革实体。如何达到这些目标呢?首先要正确的认识实体。正如我国两位著名科学家华罗庚院士和宋健院士共同指出的那样:“在定量研究客观事物时,科学工作者的责任首先是建立模型以抽象实体的主要特征,其次是逐步改进模型使其愈来愈准确地描述实体”。模型是一个广义的概念,有形象模型也有数学模型。从科学的角度来说,有数学模型,也有物理模型(如原子物理学中的板田模型)、化学模型、生物模型等。所谓数学模型,就是对实体的特征和变化规律的一种定量的抽象,而且是对那些所要研究的如可以归类于物理学类的《力学学报》《声学学报》《光学学报》《物理学报》,可以归类于化学类的《化学学报》,可以归类于天文学类的《天文学报》《天体物理学报》,可以归类于地球科学类的《气象学报》《水利学报》《地理学报》,可以归类于生物学类的《动物学报》《植物学报》《生态学报》,也都有很多数学符号。但不同类学科,所用数学基础的深度、广度是不一样的。比如,在每一类学科中选一代表,可知:《物理学报》与《天文学报》等同,两者都多于地学类的《气象学报》,而《气象学报》多于生物学类的《动物学报》。在同一类学科内部,如地球科学内部,《气象学报》多于《地理学报》;《生态学报》多于《植物学报》。如果再从时间顺序上看,随着时间的

推移,应特定特征的定量抽象。然而,数学模型本身不可能描述实体的一切特征和运动规律。它的作用不在于也不可能表达实体的一切特征,而在于表达它的主要特征,特别是表示人们需要知道的那些特征。数学模型方法在自然科学的各种分支学科中的应用是极其广泛的。

由于数学方法的意义被越来越多的自然科学工作者认识,所以,大概早在 20 世纪 70 年代,国外有些人把当时各门科学技术更多更深刻地使用数学的、数值分析的方法研究问题的趋势,描述成是“各门科学技术正在经历着数学化的过程”。如果翻阅或浏览一下代表科学发展当代水平的综合性杂志,比如我国的《中国科学》,你就会发现,其中许多专业的论文,不管是 A 辑的,还是 B 辑的,都有一定量乃至大量的数学符号和公式。如果浏览一下非数学的专业性的高级学术刊物,用数学的深度、广度,也是发展的。这正符合华罗庚院士“社会愈进步,应用数学的范围也就会愈大”的论点(《人民日报》,1959 年 5 月 28 日)。譬如,《气象学报》(1925 年创刊),在 20 世纪 30 年代一般只用初等数学,40 年代用到数学分析等基础高等数学,50 年代则用数理方程,60 年代又用概率统计、泛函分析、数值方法,80 年代又用突变论、随机过程等,随着时间推移,不难看出,气象学从定性走向定量研究的轨迹。

在现代科学中运用许多数学方法,是我们将要切入主题的生态控制中应用的基础,至少有其借鉴作用,因此,介绍了作者的一些认识。

二、从生态控制方面的认识

1. 认识过程

在生态科学从定性向定量发展的历程中,生态工作者对数学方法在其中的应用,有一个认识提高的过程。在我国,20 世纪 40 年代以前出版的生态学著作很少,50~60 年代中期(1966 年以前),中国读者可以见到的中文版生态书籍有王汶译、乐天宇审校的前苏联谢尼阔夫 40 年代所著的《植物生态学》(新农出版社,1953)、乐天宇著《植物生态学》(中国林业出版社,1958)、何景编《植物生态学》以及乐天宇著《植物生态型学》(科学出版社,1966)等几本。通观这些书籍,其中也有关于生态控制方面的内容,如讲述森林在保护生态以发展农业中的重要意义,可见当时许多生态含生态控制方面的研究者,对于应用数学方法以定量地处理问题尚有很大距离。直到 70 年代中后期,我国才有一批掌握高等数学基础的研究者,从不同学科领域介入生态研究,才使中国同行了解到大约自 1920 年以来的数理生态学之概貌。在这种发展形势下,一些原来接触高等数学极少的生态研究者(有些在 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始补习微积分、概率论、高等代数)曾不止一次地提出问题:“对于一个生态问题,你们为什么一定用物理或数学公式来表达?为什么偏要用那么多数学符号、方程式或不等式呢?能不能用通用的纯粹汉语一语道破地把问题讲清呢?”诚然,人们对于生态控制问题的最初认识可能是用口头语言或描述性文字来表达的。比如说,在冬季气候寒冷的地方要穿一定厚度的棉衣、裘皮衣服以御寒,这就是通过人为措施来控制致冷的生态动力源(低温寒风,更进一步追其源为天气形势,可能是寒潮冷锋之后的冷气团控制),使其对人的身体这一生态动力汇的负生态动力效应减小。这样描述的大概意思早已有之,在《论语》就有子路所说“衣轻裘”的文字,可见至少在 2500 多年以前的山东人就知道裘皮衣服能御寒的道理。类似的例子可以举出很多,如爱斯基摩人的冰屋、现代建筑物、防洪堤坝等都有对生物环境加以控制、调节的功

能。流传或文字记载多年的说法也可以谓之“文字模型”,对于后来进行其数学模型研讨的人,至少是一种有益的启发。事实上,许多用数学模型方法研究生态控制的人都明确地认识到:“文字模型”是他们建立数学模型的“序幕”,即初步阶段。在这一阶段,将那些与设计模型问题有关的一切看法结合在一起,对所研究的生态控制问题用书面文字恰当地描述出来,而尤其应当对与系统控制思想有关的那些内容加以强调。但是,针对同一生态控制问题分别进行文字描述的人,他们描述的结果往往会彼此不一致,而对于系统中的某些组成部分,写出的材料可能大相径庭。对于有较多研究者参与的项目组,对系统分析中的复杂问题,意见之分歧可能很显著,分歧不易说明。这样的文字描述,对于生态控制问题的解决,尤其是在有限时间内解决,似乎无大裨益。而实现建设的需要,又要求研究者尽快提出控制建议,是一个矛盾。因此,一些生态研究者反对“文字模型”这样的说法。因为“文字模型”只意味着一种描述,因此没有必要给用文字描述事物的这样一种非常一般的做法命以复杂化的名称。实际上,很多有系统分析经验的研究者认为:“文字模型”一般是不值得强调的,除非这些模型集中在某些问题的定义、界限、目标和对象等级鉴定的范围之内。而一部分有经验的分析者,很可能把观察到的现象、事实,迅速地转化成为产生一系列模型的依据,并从初步形成的经验模型中,选择出最合适的模型。

2. 生态控制中的数学模型与模拟

关于数学模型的意义前已初步提及,并介绍了华罗庚、宋健、关肇直、戴汝为几位院士对此的见解。一般说来,从广义上讲,数学中的点、线、面、集合、群、环、线性空间、拓扑空间等等都可以叫做数学模型。但是,应用者为了不把数学模型与纯数学等同起来,数学模型须体现其某些应用数学特征,如果结合我们的生态控制问题及其一系列研究对象,可以概括为三点:第一,它从客观存在的生态控制原型出发,提出须用什么样的数学手段为工具,列出数学公式或绘出几何图形;第二,运用数学工作者已经研究出来的数学方法在数学公式或结构图形上展开推导、演算和分析,以获得解析解或数值解;第三,它必须回到现实的生态控制原型中去,对生态控制的实际问题作出判断,以达到解决实际生态问题的目的。

数学的力量不仅是有数和形的意义,而且在于它能够提供一种表达思想的工具,特别是处理极复杂关系符号逻辑的方法的能力,与此同时,又保持了表达式的简明性和节约性。毫无疑义,对于一个生态工作者来说,“表达式的简明”是重要的。数学表示法的整个基础,就建立在作为一种符号逻辑关系的简明表达式上,而这类表达式,是一种形式上的表达式。

当生态系统的各种组分的数值发生变化时,处理生态控制问题中各种因子关系的数学法则,使人们能够作出所期望的生态控制方案的结果。有了这些结果,可以用模型给出的结果同现实的生态系统之间加以比较,检验模型的精确度。

3. 确定型数学模型

在生态控制系统中,有些客观存在的事物之间具有确定性的关系。如果事物的变化服从确定性的因果关系,以致可由前一时刻的运动状态推知后一时刻的运动状态,这就是必然现象。如所周知,经典数学是刻画客观世界中确定性事物必然现象的一种方便而且可靠的数学工具。从客观事物中提炼必然现象的数学模型,一般表现为针对确定性问题的各种数学方程式:代数方程、函数方程、微分方程、积分方程、差分方程等。其中,尤以微分方程式最为普遍。

大约于 17 世纪 60 年代,人们利用经典的数学方法,把天文学、力学、热力学、电磁学的基本定律表示为微分方程式。这大概是微积分最早在描述物理运动形式中的应用。在与生态控制有关的应用方面,据现有资料,大概最早在 18 世纪。至今应用很多,下仅举古今几例。

(1)关于物候期与环境之间关系的热总量模式

在 18 世纪,Reaumur 设想,当春季温度就时间的积分达到一个必需值的时候,花就开了。从那以后,人们懂得:必须充分考虑光和水分的有效性以及某一界限温度以下的无效性,从而对这样的简单规则进行修改。人们还懂得了,对于一定的地点和适宜的周围环境温度的一种有机体、一种植物来说,当积分

$$\tau = \int_{t_0}^t (T - T_h) dt \quad (2-1)$$

达到一个临界值度 - 日 C (degree-day) 的时候,一种物候现象就会发生。上式中, T 和 T_h 分别是当年温度和界限温度(即起点温度)。表示物候期 P_n 与环境关系的公式就是 $\tau < C$ 时, $P_n = 0$, 而 $\tau \geq C$ 时, $P_n = 1$ 。

(2)机体种群增长模型

机体种群增长的最简单的模型之一就是一个简单的微分方程式:

$$\frac{dy}{dt} = ry \quad (2-2)$$

式中, y 是种群在时间 t 时的密度, r 是一个常数。细菌种群在培养基耗尽之前的增长就可这样一种模型来表示的一个生物学的过程,其中增长率在时间的任一点上都是该时间种群密度的一个比例。仅通过用这种形式表达的关系,我们就可以用微分方程所表示的符号逻辑的特定种类的性质,指出也能用公式

$$y = y_0 \exp(rt) \quad (2-3)$$

表示的在时间任一点的种群密度。式中, y 是在时间 t 时的种群密度, y_0 是在时间 $t = 0$ 时的密度, r 是一个常数。

上述那种简单的指数模型的用途颇为有限。因为一个增长中的机体种群通常会耗尽它的资源,并因此而下降到某一平稳密度。具有上述性质的更迭模型,可以写成以下的微分方程式:

$$\frac{dy}{dt} = ay - by^2 \quad (2-4)$$

式中, y 的意义同样是在时间 t 时的种群密度, a 和 b 都是常数。同样,这个模型也可以用方程式

$$y = \frac{a/b}{1 + \exp[-a(t - t_0)]} \quad (2-5)$$

表示。式中, y 是在时间 t 时的种群密度, y_0 是时间 $t = 0$ 时的种群密度, a 和 b 都是常数。这个logistic模型十分恰当地表示一种有限资源供应细菌种群增长。种群,在其增长之初,按指数律增长,而当资源变得有限时,其增长逐渐变缓,直到种群数量达到一定水平,呈渐近线。此外,作为在模型的数学表达式形式符号逻辑内的一种逻辑推理,通过对模型原始方程式的简单的代数处理,可以预测出其恒定水平将是 a/b 。换句话说,以抽象的数学名词,代替文字来表达模型,使我们能够立即从模型预知未来数据。

(3) 日光温室接受太阳辐射量的表达式

太阳作为一级生态动力源,通过温室的塑料膜直接把光和热能供给温室中的生物。温室内的相对受光量、受热量,在时间和空间上都有很大的变化。从空间上来说,温室为三度空间,用一般的三维笛卡儿直角坐标系表示。假定温室是坐北朝南的,令南北跨度方向为 x 轴,测定沿 x 轴跨度之长度的起点(即坐标原点)定于温室室内的西北角上的那一点,用文字 0 表示之(见图 2-2 之 a),东西方向(即栋长方向)则为 y 轴,0 点亦即 x 轴和 y 轴的交点(见图 2-2 之 b)。在温室的西北角,自地面向上的方向为 z 轴。0 点既是前述 x 轴与 y 轴的交点,同时也是 y 轴与 z 轴的交点。图 2-3 便把各轴结合起来。我们在这里,可以有充足理由地把温室内的点 (x, y, z) 在时间 t 接受的太阳辐射量表示为 x, y, z, t 的函数,即有

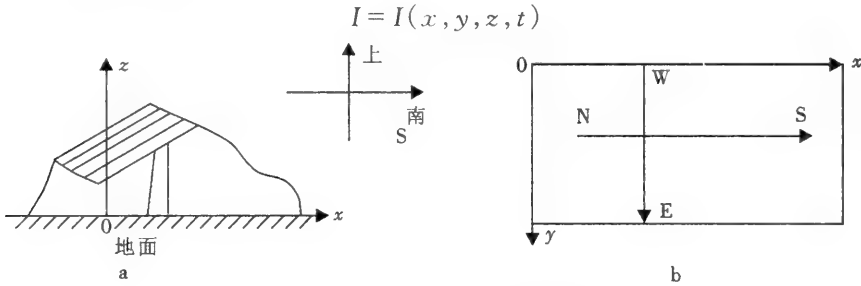


图 2-2 日光温室的空间表示法

a 图为 x, z 截面; b 图为 x, y 平面

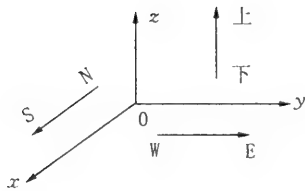


图 2-3 日光温室各轴关系

整个温室接受的太阳辐射总量 I_a 是有限多的各点(假定每一点表示一个体积范围)热量的累计,实际上是连续情形。于是,我们有

$$I_a = \int_{t_1}^{t_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} I(x, y, z, t) dx dy dz dt \quad (2-6)$$

式中, $t_2 - t_1$ 相当于白昼的长度, $y_2 - y_1$ 相当于栋长, $x_2 - x_1$ 是跨度, $z_2 - z_1$ 是从地面到棚顶的高度。

(4) 植被-大气互作系统中叶、冠层传导

在该系统中,为求标量守恒所造成的限制,所列出的偏微分方程是:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla c = -\nabla \cdot \mathbf{f}_c \quad (2-7)$$

式中, c 是守恒标量的密度, f_c 是湍流分子通量的密度向量, \mathbf{U} 是速度平均向量。为了进行模拟,该方程总是就空闲体积 R (意即没有植物而只由空气构成的那部分空间,比如说冠层中的空闲空间)进行积分,这里所说空间可以限于整个对流边界层的空间。设 R 部分地受到陆地-大气交界面的限制,这样,它的闭合边界面 $S = S_r + S_A$, 包括 S_r 和 S_A 两个部分,这里的 S_r 涉及陆地-大气交界面,涉及植被或土壤,而 S_A 涉及空中条件。用辐射原理、守恒方程可以就 R 进行积分,即有如下的涉及偏微分和积分的方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_R c dx = \iint_{S_r} U_n c dS + \iint_{S_A} f_c dS + \iint_{S_r} f_c dS \quad (2-8)$$

式中, $U_n + f_c$ 是 U 和 f_c 在 S 上的内向一正规分量, x 是位置坐标。该方程式右边的三

项分别相应于平流、大气通量辐散和地面通量引起的标量输入。如果最后一项写为 $S_r F_c$ (这里 $F_c = \langle f_c \rangle$, 是表面 S_r 上的面积平均通量密度), 那么方程就成为

$$F_c = \frac{1}{S_r} \iint_{S_r} f_c dS = \sum_{i=1}^n a_i f_{ci} \quad (2-9)$$

式中, S_r 含有面积为 S_i 的几个部分, 标准化处理是 $a_i = S_i/S_r$, 通量密度为 f_{ci} 。

以上说明涉及植被、大气和土壤的多种不同性质的生态动力源和汇关系的确定型表达式。但这样做, 是用了假定条件的。应用时, 往往须用离散求和等。

(5) 林带水分蒸发模型

在森林生态学研究, 直到本世纪 40~60 年代, 应用数学分析、常微分方程和偏微分方程表达定量规律的场合, 仍是很少的。在我国, 用得更少。70 年代以来, 由于原来从事物理学、流体力学以及陆地水文学等学科研究的专家介入森林生态学的研究, 才使防护林网、林带的研究走向数学化、物理化和新技术化。随着实测数据的增多, 电子计算机的应用, 这类研究近 20 年有了突飞猛进的发展, 为三北防护林建设提供了科学依据。现就林带附近蒸发规律研究中运用微分方程的例子, 简要说明之。

林带附近的比湿增量随着高度的增高而增大, 即垂直梯度为正值, 减小了无林带时负的垂直梯度值, 从而抑制了蒸发作用。设无林带时水平的均一下垫面蒸发率可用水汽通量方程计算, 则蒸发潜热 Q 可表示如下

$$Q = LE = -\rho K_z L \frac{\partial q_1}{\partial z} \quad (2-10)$$

式中, L 为蒸发 1 g 水所消耗的热量, 与气温 $t(^{\circ}\text{C})$ 有关。

$$L = 4.18 \times (597 - 0.6t)$$

由式(2-10)并用东北西部农田防护林区的观测结果可以估价林带对蒸发的影响。据野外观测结果, 热季白天(07~18 时)潜热通量可达 $627 \sim 941 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{d}$, 平均取 $Q = 1.09 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{min}$ 或 $1.8 \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s}$, 湍流黏滞系数平均取为 $K_z = 2000 \text{ cm}^2/\text{s}$, 平均气温 $t = 20^{\circ}\text{C}$, 则空气密度 $\rho = 1.189 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 。于是有

$$\frac{\partial q_1}{\partial z} = 3.07 \times 10^{-6}$$

设林带附近的蒸发率为 E' , 比湿梯度为 $\partial q'/\partial z$, 湍流黏滞系数为 K'_z , 则相对蒸发率为

$$\frac{E'}{E} = \frac{(\frac{\partial q'}{\partial z}) \cdot K'_z}{(\frac{\partial q_1}{\partial z}) \cdot K_z} \quad (2-11)$$

若不考虑林带对湍流黏滞系数 K_z 的影响, 则上式可改写成

$$\frac{E'}{E} = \frac{(\frac{\partial q'}{\partial z})}{(\frac{\partial q_1}{\partial z})} = \frac{(\frac{\partial q'}{\partial z} + \frac{\partial q}{\partial z})}{(\frac{\partial q_1}{\partial z})} \quad (2-12)$$

式中, $q' = q_1 + q$, q 为林带影响下空气的比湿增量, 于是在林带的影响下蒸发减小的百分率——林带的蒸发效益 V 为

$$V = 1 - \frac{E'}{E} = - \frac{\left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\partial q_1}{\partial z}\right)} \quad (2-13)$$

由式(2-9)求得

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial z} = & \frac{-1}{\sqrt{4\pi kx}} \cdot \frac{J}{H} \left\{ (H+z) \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{4kx}\right] - (H-z) \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{4kx}\right] \right\} \\ & + \frac{Jz}{H\sqrt{\pi}} \left[\sum_{n=1}^l \frac{[(H+z)^{2n} - (H-z)^{2n}]}{n!(\sqrt{4kx})^{2n+1}} \cdot (-1)^n \right] \\ & + \frac{J}{H\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{2H}{\sqrt{4kx}} + \sum_{n=1}^l \frac{[(H+z)^{2n+1} + (H-z)^{2n+1}]}{n!(2n+1)(\sqrt{4kx})^{2n+1}} \cdot (-1)^n \right\} \end{aligned} \quad (2-14)$$

利用式(2-13)、(2-14)可以根据湍流系数、风速、气温、林带与旷野的湿度差 Δe 及辐射状况等估算林带保护下的蒸发效益。作为例子,计算了半干旱半湿润地区夏季晴天林带附近的蒸发效益。由此可以看出不同参数时,林带附近蒸发量减少的规律。

4. 随机模型

在关于生态控制的许多问题中,人们总是期望得到确切的数学模型,用代数方程、微分方程、积分方程或差分方程表示控制关系。因为这类关系是独一无二的,所以通过解方程得出其根或确切的解或者是近似的解析解,再依所得结果控制生态动力源或汇,使生态系统生产力及生态环境增优。然而,在生物与环境的现实世界中,有许多客观存在着的,并不是用微分方程等确定性数学模型能够描述的。也有的现象,在现阶段人们认识的水平下,是不能用确切数学模型表达的。数学上已有适应这种偶然现象的数学模型,这种模型同样是生态控制所用的一种有效的模型,而且在处理实用问题、实验数据以及非数量的但可以作数量化处理的那些资料方面,就显得更为有用。这种偶然现象,也叫做偶然现象或随机现象。在生态控制中,如土壤中施多少N,P,K,能使作物增产几成,一个区域内,森林覆被率多少及其怎样分布,才能有效保护其农田生态环境。在沙荒和原无树少树的荒山秃岭营造一定面积的生态林,对当地及下风方向区域沙尘有多大影响。这些涉及很多偶然因素的随机关系,一般难于用微分方程等确切表达。面对这样一些复杂的生态控制问题,在20~30 a前,我国相当一部分生态研究者,认为用数学方法找出规律,尤其是在数据少或很不完整情形下,当时的基层农林医技术人员就很少或根本不考虑数学方法,加上当时的计算设备落后,也或因他们数学知识有限。但是,后来人们认识到,虽然这些生态控制问题不遵循微分方程所描述的那样确定性的规律,但却服从一种概率统计的规律。所谓概率统计规律正是从偶然现象中找出的必然规律。为探索这种规律而产生的数理统计、随机过程等一系列理论构成了随机数学模型。并有其在统计力学、布朗运动、生物遗传等多方面的应用。在生态控制中,随机数学模型用得相当广泛。下面举几例。

梨树发芽日期函数 y 与温度函数 x 关系(小野,1988),可以写为

$$y = 7953.4x + 24.937$$

式中, $y = \ln(1/G)$, G 是从温度处理开始到发芽的日数, $x = 1/(t + 273)$ 。有了这个关系,就可以用控制温度这一生态动力源的措施来控制梨发芽的日期,以满足优化栽培的某种要求。比如让梨树开花晚些,以避免低温天气之害。

上面是线性回归,还有一些指数形式的回归方程式(А. Д. Зйюбов, *Метеорология и*

Гидрология, 1981), 如:

$$y_1 = 32.96 \exp(-0.004225x)$$

式中, y_1 是石榴果汁含酸量, x 是 9 月份的积温。

统计检验也是一种有效方法。如关于减灾措施的 Friedman 检验(裴铁璠等, 1999), 对有限数据经检验及多重比较, 指出生态减灾优于化学和遗传两种措施。

由于偶然现象模型在生态控制方面的应用较多。在此不具体介绍, 而说明它在实际研究与实践中, 是生态控制的重要基础。

5. 生态控制中应用数学模型的讨论

生态控制中应用数学模型的主要优点在于可以精确、抽象地说明许多复杂现象和方案的要点, 使人们对问题的认识, 遵循一定的理论基础。数学模型的缺点在于符号逻辑的明显复杂性, 对于许多数理基础不足的生态工作者, 容易望而生畏。另外, 输出的结果, 与客观实际有一定的差异, 又难于用事实加以解释。另有一些更为复杂的问题, 所建模型容易曲解生态控制问题的实质。

建立生态控制数学模型问题的相对复杂性和相对困难性, 可以从本质上深刻认识, 也就是从哲学原理中的物质运动的五种形式上认识之。力学之所以能最早最好地运用数学是因为它所研究的对象属于低级的机械运动形式; 此后, 则依次是物理运动、化学运动、生物运动和社会运动。自然辩证法专家明确指出: 物质运动形式愈高级, 其数量关系也愈复杂, 数学化也就愈困难。由于属于生物学科的生态控制原理研究的是生物运动, 所以它的数学化当然比物理学、化学乃至地学困难。生态控制从描述向理论的发展, 从定性科学向定量科学的发展, 在很大程度上得益于物理学、化学、生物学中的生理学、遗传学等以及控制论、系统论、信息论向其中的渗透。研究者一般须了解数学在上述诸多学科的应用途径, 才便于渗透乃至移植的实现。比如生态动力预报的提出, 就是地球科学中的数值天气预报向生态控制渗透的一种有益的结果。生态控制数学模型的完善化, 除知识因素外, 从方法论上有赖于研究者既要敢于假设, 又要善于求证, 尤其是小心谨慎的求证。因为只有当一门学科的发展达到一定阶段, 对研究对象及其属性在质的方面有所了解, 即有了一定程度的定性认识, 并有某种技术手段可以对有关对象及其属性做定量描述时, 才有可能引进数学方法。在目前, 生态控制问题的许多方面, 尚不具备上述条件, 所以还不能很好地真正实现其数学化。当务之急, 是我们从原理上进行探索, 从资料上进行准备, 从设备上优化。相信, 生态控制数学模型的建造暨生态控制原理数学化的成果, 是指日可待的。

第二节 生态控制的物理学基础

从哲学所论的五种物质运动形式看来, 机械运动和物理运动乃是其前两种运动形式, 力学和物理学则是分别研究该两种运动的学科。但是, 在现代自然科学的六大基础学科中, 力学不能算作其中之一, 一般都把它列入物理学中。我们这里按自然科学分类的常规惯例, 也把力学作为物理学分支之一, 论述其在生态控制原理中的基础作用。同属物理学的热力学、光学以及原子物理学等, 关于它们在生态控制原理形成中的基础作用, 则接续论述。而有些更细、更深的物理学分支在生态控制中的作用, 尚待今后探索, 本节将不予具体论述。

一、力学的作用

力学的研究对象,是自然界大多数物质层次所共有的简单的空间位置移动形式,其中包括宏观机械运动形式,而且仅仅从质量和动量两方面来考虑它的规律性。^①因而,与其他学科相比,它具有更大的抽象性。正是这一点,决定了力学方法移植的广阔领域。使它大约在16世纪初开始用于生物学领域。这为力学在生态控制中的应用奠定了生物学方面的基础,而在地学中的应用,为力学在生态控制中的应用奠定了环境方面的基础。

1. 固体和固-液两相流混合物生态动力源及控制要点

在地貌及重力生态动力源中,固体和固-液混合物往往是灾害地貌形成的力学基础。其中的崩塌是指斜坡上的岩土块体,在重力作用下,突然发生的沿坡向下急剧倾倒、崩落现象。这种作用危及人、畜和植物,即成为一种固体生态动力源。在防治中,首先查明其发生范围,使生物避开其范围是一种防御措施,是一种调节生态动力汇以减免机械作用对于生物危害的生态控制手段。

滑坡是指构成斜坡上的岩土体在重力作用下失稳,沿着坡体内部的一个(或几个)软弱面(滑动面)发生剪切而产生整体性下滑的现象。滑坡危及生物而成为重力生态动力源。近在2002年初,长江上游重庆山区还出现滑坡并造成人的伤亡。治理滑坡使其免害生物的生态控制措施的方法,一是防止地下水、地表水对坡脚的掏蚀,二是增强滑坡的重力平衡条件,可以改变滑坡外形,降低滑坡重心,也可以修建支档建筑物而增加抗滑力。而圈定其范围,使生物少进入滑坡影响圈,乃是一种防御的生态控制措施。

泥石流作为一种重力生态动力源,发生的地域比前两种大得多。对生物危害的例证也很多。它是一种固液两相流,是由大量泥沙、石块等固体物质与水混合而成的沿山坡或沟谷流动的一种特殊洪流。这股洪流作用于生物是一种重力生态动力源。泥石流的生态控制措施很多,主要有林业措施(如营造水源涵养林、水土保持林、护床防冲林和护堤固滩林等以涵养水分、削减洪峰、控制泥石流等)、农业措施(如等高耕作、立体种植、免耕留茬、选择作物等以扩大覆盖面积、减少水土流失等)和牧业措施(如适度放牧、分区轮牧、改良牧草等以保护草场、控制水土流失等)。

2. 气-固两相流生态动力源及其控制要点

这里说的气体指大气运动产生的地面风,固体有沙粒、尘粒等。地面上非固定的沙(尘)粒受到风的动压力作用而产生的动力矩大于固体颗粒的重量力矩时,沙(尘)粒便开始沿沙(尘)面滑动或滚沙,碰到地面突起沙(尘)粒或与其他沙(尘)粒相撞时,由于冲击力作用,使沙(尘)粒骤然上升,进入边界层乃至更高一些层次的大气气流中,形成沙(尘)暴等风沙流。以沙(尘)这种固体颗粒为生态动力源以高空气流或地面气流为生态动力媒介的运动,其生态效应主要表现在对被害区生物环境的破坏上。关于沙尘暴的生态控制,一般用生物措施,在有关地区[主要是导致城市沙尘暴的上游沙(尘)源区]植树种草,可减缓地面风速。但也有研究者认为沙尘暴主要受大气运动规律左右,人类能够控制它

^① 从现代科学的观点来看,严格意义上的现代力学,是以自然界一切物质运动形式都包括着的简单空间位移为对象的。因此,它无疑包括统计力学、量子力学和相对论力学等。机械运动是空间位移的宏观形态,不能将一般空间位移(包括微观、宏观、宇观及高速领域的位移)与机械运动相等同。只有经典意义上的力学,才以宏观机械运动作为研究对象。鉴于本书的性质和现有相关文献的限制,我们本书中所提到的力学,仅限于经典力学及相应方法。

的能力不大,而称植树种草等为人工影响措施较为合适。

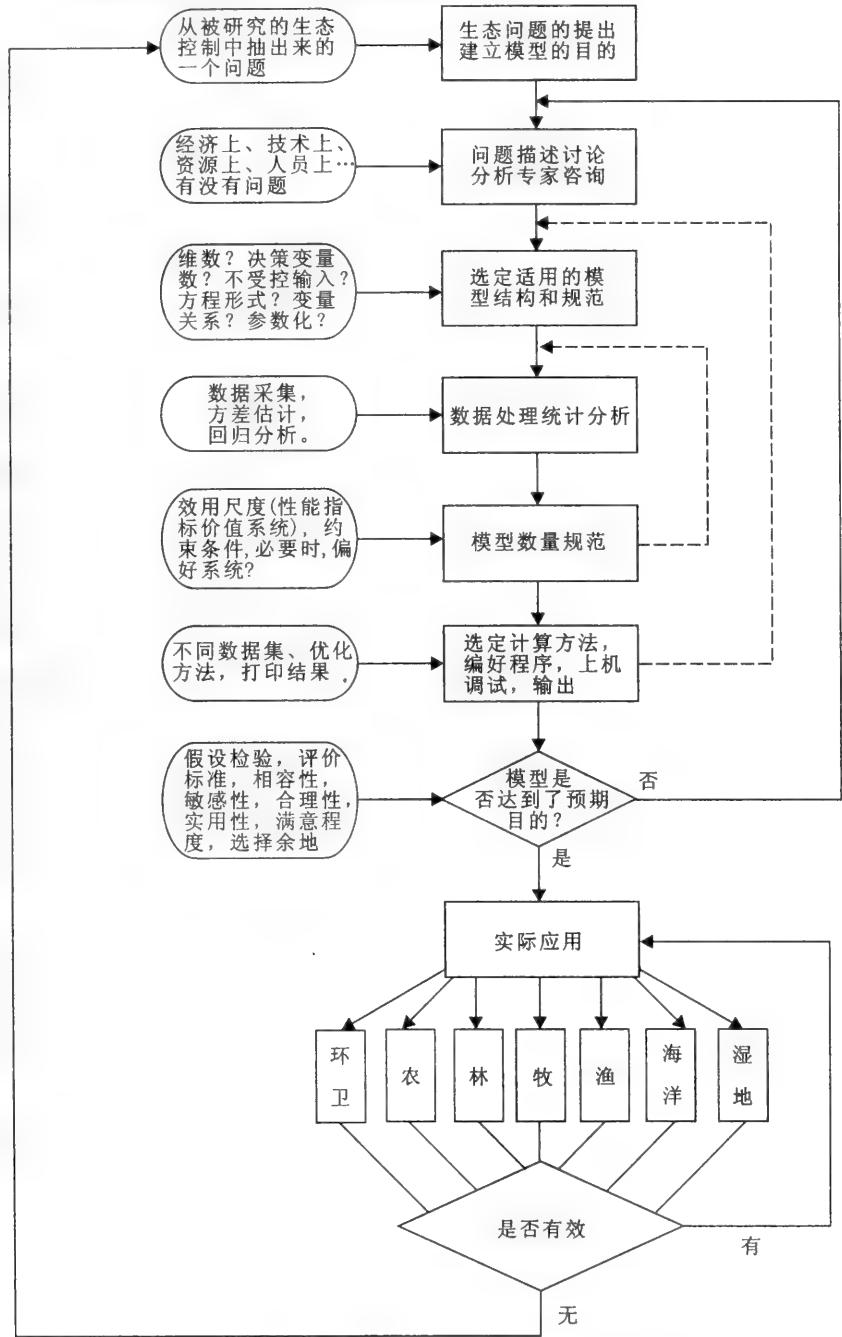


图 2-4 生态控制模造及其实用之流程示意图

3. 液相生态动力源及其控制要点

液相生态动力源主要表现为水文生态动力因子的作用,最明显的作用是洪水对生物的直接冲击作用。在天空降水落到地面后,在坡面上和土层中产生径流,并沿坡地向河槽汇流,抬高了河槽中的水位,增大了径流量。由于降雨量空间分布不均、河网水系密度与分布形状的差异以及水流汇集的速度不一样,所以河道接纳的水量,沿程不同,水量多

的地区较之水量少的地区水位高、流量大,使水深沿程分布不均匀,形成波体,称为河道洪水波。洪水水位高于河床而溢出,形成水灾,并危及岸上的农作物、家畜和人等生物,成为一种带有严重破坏性的生态动力源。

防治洪水应该采用工程与非工程相结合的措施,不久前作者提出了东北地区天然林保护和水患治理方略,推出了松花江、辽河流域生态—工程防洪减灾体系。

4. 气相生态动力源及其控制要点

气相生态动力源主要指空气运动对生物的影响。这里所说的空气运动主要是说明其水平运动的风和垂直运动的上升气流。

风对植物影响的研究,主要包括风对森林、农作物、牧草作物的影响。多年来,这方面的研究很多。

在森林方面,最早的工作是由德国 Geiger 开始的(20 世纪 20 年代),中国 50 年代初袁嘉祖在冀北沙荒作过观测研究,朱廷曜从事防护林气象研究数十年,其中关于风的影响研究(含风洞模拟)占很大比重,张翼则于 1990 年专门发表了防护林对风影响的专著。在风倒方面,《生态动力学》一书已有近年研究的例述。这些都离不开力学基础。前几年,德国 Baucker 研究了云杉树干隆起物及其在风的作用下的易折性,这是从生态动力汇本身的理论力学、材料力学特征探索抗风性的解剖研究,对于控制风对云杉危害,也是一种力学基础性研究。通过宏观观察发现:云杉树干折断部分出现色变,而且折断纤维主要在背风面,向风面也有部分纤维,有间距 20~60 cm 的隆起物。木材的抗拉强度、抗断裂强度、抗压强度分别降低 57%,40%,17%;通过光栅显微观察发现:纤维损伤,管胞壁侧面弯曲。此类云杉多位于向西坡地和林缘,易受风害。风对树木的强烈冲击导致树木背风部分纤维严重损伤,故有隆起的云杉,树干抗风强度降低,易折性加大。

风使农作物折断或倒伏的机理同风对木材的作用的原理,本质上是一致的,都是气相生态动力源对固相生态动力汇的作用,即流体对刚体的作用。在农作物中,一些高秆但抗风力弱的热带果树,许多高秆农作物,都会因风的直接冲击而受害。

为了减轻风对植物的直接冲击,人们有许多防风办法,如建防护林、防风墙,设防风网等,都有减缓风直接对生物冲击的作用。但治本的防风措施乃是通过生态育种的父本、母本的合理组合培育具有较好抗折基因的下一代品种,比如使其茎秆坚硬,使果实结在比较偏下部位,以增大其稳度,从而增强抗风能力。并且,在作物引种和品种布局上,将抗风力差的品种安排到相对避风之地位。上述一切措施,如果不同控制论结合,并不能达到最优控制的理想控制目标,充其量不过是机理控制而已(有些则是感性经验控制)。为此,生态控制风害的发展方向应用控制论以及其他系统手段,以达到最优化之目标。但从前述内容不难看出,欲达到这样的目标,是离不开生态控制之力学基础的,否则只能是一般的优化而非专致于与防风机理结合的优化了。

风对动物和人的直接危害,主要在于突发事件之前缺少必要准备的情况下。比如龙卷风的危害和在牧区风对羊群的危害等,其最优生态控制措施是在常有风灾发生的地方,用运筹学中的适宜方法作出决策或对策表,再依此表决定在某阶段某种条件下,采取什么行动。以达到既不影响正常作业效果又可保障人畜安全的目的。

二、热力学的作用

生态系统中能量以多种不同的形态出现,但不同形态的能量都可转化为热能,所以

在生态系统中一般用热能单位和作功单位表示。在农业生态系统中,人工辅助能——人类在农业生产活动中投入的能量,含生物能(劳力、畜力、种苗、有机肥料等)和工业能(化肥、农药、机械、燃料、电力等)——是通过人工生态动力源投入到被控对象的能量,而这些能量服从热力学定律,所以优化控制须以热力学定律为科学基础。这就是生态控制原理以热力学为学科基础的根本出发点。下面就结合生态控制原理,说明有关的热力学定律的应用原则。当然,生态动力的最重要者是作为一级生态动力源的太阳辐射热量,对于它的生态控制问题,当然是通过人类活动,更好地利用它为进一步发挥其功能而努力。

1. 热力学第一定律与生态控制原理

如所周知,热力学第一定律也称能量守恒定律,生态动力系统中的能量流动遵守热力学第一定律。热力学第一定律主要包含两个方面:其一是能量转换,如在生态动力系统中,太阳辐射能→化学潜能→热能的转换规律,日光温室内作物生长正是这种转换的一个代表;其二是能量守恒,即在能量流动和转化过程中,能量既不创生,也不能消灭。热力学第一定律的差分表达式为

$$Q = \Delta E + W$$

式中, Q 指生态系统从外界吸收的热量,输出热量时为负值; ΔE 是生态系统内能的增量; W 指生态系统对外界做的功(外界对系统做功时,它为负值)。热力学第一定律,应用于生态动力系统中的时候,可用如下公式表达:

绿色植物同化的太阳能 = 贮存在植物体内的化学能 + 植物呼吸消耗的热能

2. 热力学第二定律与生态控制

在物理学中,热力学第二定律又叫做衰变定律,是指自然界的一切自发过程,有一定的方向和限度,而且是不可逆的。对于该定律,一般可以从以下两个方面理解:

其一,任何自发过程总是单方面地趋向于平衡状态。凡不必借助外力而能自动实现的过程都叫做自发过程,反之叫做非自发过程。例如,热总是自发地由高温物体传递到低温物体,直到两者的温度相等,这种传递过程才告一段落。如在运行时不采用非人工加温的措施,在育苗小棚内的土壤上层设置地下酿热物,其目的是使 0 cm 以下的热量传递给 0 cm 及以上供秧苗生长发育所需的热量,而设人工电光源或设电热线实际上是把电能转化成的热能传递到育苗小棚内的空气之中,以为秧苗提供适宜的生态环境。这样的生态控制机制,生产者在实践事实上已经运用,但在我国至今大都未应用生态控制原理进行定量的优化控制,有待解决原理后,才能达到优化目的,而这种优化的基础是热力学第二定律,优化控制是经由人工生态动力源,使自发过程有效地快速趋向于有益于生物环境的动态平衡。

其二,不能自动进行的过程,并不等于不能进行,只不过需要外力,即需要环境对它作功,过程才能进行。例如,在生态动力系统中,复杂的有机物质分解为无机物质的过程可视为自发过程,而无机物质决不能自发地合成有机物质,必须借助于外界对系统作功,即借助于太阳辐射这个一级生态动力源放出的部分能量,才能使二氧化碳、水等无机物质转化成为有机物质。

由热力学第二定律可知,任何能量转换过程的效率都不可能达到 100%。因为能量在转换过程中,常常伴随着热能的散失。在生态动力系统中,当太阳辐射能到达地球表面时,其中只有极少部分的能量被绿色植物吸收而转化为化学潜能,大量光能转变为热能而离开生态动力系统进入太空。而当进入生态动力系统能量在生产者、消费者和

分解者之间进行流动和传递的过程中,一部分能量同样转变为热并消散,剩余的才用于作功,并合成新的生物组织作为潜能贮存起来。由此看来,能量在生态动力系统中的流动是单向的,不能返回的,因此只能称其为能量流动。

3. 熵、耗散结构与生态控制

熵(entropy)是从热力学第二定律抽象出来的一个概念。如所周知,熵也是对系统的无序程度进行度量的一个热力学函数。其含义是系统从绝对零度(即 0K)(无分子运动)的最大有序状态向含热状态转变过程中温度变化时的热量变化,即熵变化就是热量变化与绝对温度之比,在温度处于绝对零度时,熵值为零。由此可见,熵实际上是对热力学体系中不可利用的热量的量度。一切自发过程总是向熵值增加的方向行进。这包括自然的生态过程,有了这样的本质上的认识,是可以合理采用人工控制措施来调节自发过程,使自然控制逐渐向对人们有利的方向发展。而系统保持有序必须从外界吸取负熵,则是生态环境优化调控的最基本的热力学基础。

耗散结构是诺贝尔奖得主 Prigogine 于 1969 年在“理论物理和生物学”国际会议上提出的理论,30 多年来,研究者很多,并有了很大进展。如所周知,耗散结构理论实质上是从事热力学第二定律出发,提出的开放系统的非平衡态热力学。Prigogine 指出:“非平衡态可成为有序之源,不可逆过程可导致称为耗散结构的一种新型的物态。”一个远离平衡的开放系统(无论是力学的、物理学的、化学的、生物学的或社会的系统),可以通过与外界环境进行物质和能量的不断交换,以增加系统的负熵,使系统保持有序状态和一定的稳定性。利用与外界环境物质、能量等的不断交换,使原来趋于无序和混乱状态的系统变为有序和稳定。生态系统本身正是这样一种开放的和远离平衡态的热力学系统,具有发达的耗散结构。在能量和物质不断输入的过程中,在进行系统结构的自组织过程中,是不应当离开生态控制原理的。这就是说,对于一个生态动力系统,只有控制好它的物质和能量耗散的“度”,才能使结构处于相对有序状态。生态县成功建设之许多例子,可用此加以解释。而这正是以热力学第二定律为基础的。即生态动力系统服从热力学第二定律和熵定律,一个具体生态系统(或有机体)要维持一个有“内秩序”的高级状态,即低熵状态,同时需要有太阳能和辅助能。

三、光学的作用

物理学中的光学是光发挥生态作用的科学基础,也是研究自觉或不自觉地控制生物光环境的依据。

光对植物生态作用的现象和机理,早已被人们所公认。不同的光质对植物的光合作用、色素形成、向光性、形态建成的诱导等的影响是不同的。光合作用的光谱范围只在可见光波长范围之内。光照强度与植物细胞的增大和分化、体积的增长和重量的增加关系密切;光还促进组织和器官的分化,制约着器官的生长发育速度,使植物各器官和组织保持发育上的正常比例。黄化现象(etiolation phenomenon)是光与形态建成的各种关系中最极端的典型例子,黄化是植物对黑暗环境的特殊适应。在种子植物、裸子植物、蕨类植物和苔藓植物中都可发生黄化现象,不过,光对植物的形态建成作用还受光敏色素等因子的调节。光照强度对植物的繁殖有很大的影响。植物花芽的分化和形成虽受诸多因素的影响,但光照强度的作用是非常重要的,植物在完成光周期诱导和花芽分化的基础上,体内养分的含量至关重要,光合产物越多,对花的发育越有利。一般说来,植物遮光

后,光强减弱,同化量减少,花芽的形成量也就少,而且已形成的花芽因体内同化物较少而发育不良乃至早期死亡。光与植物产品质量有着密切关系。水果颜色的好坏是其品质的标志之一,果实颜色是叶片中的色素源运行到果实内,经过氧化酶在氧充足及温度较高的条件下,受感光作用而产生花色素苷显色所致。光照强,形成的花色素多,在强光照射下,果实含糖量增加,耐贮性增强,同时,果实在成熟时发出的香味有吸引动物摄食、传播种子的重要功能。光照时间对植物的影响主要表现在三个方面:其一,日照长度对植物繁殖特性的影响,每天日照长度对植物开花往往有决定性作用,据此将植物分为长日照、短日照和中间型三种;其二,日照长度与植物分布、起源有关;其三,日照长度对植物休眠和地下贮藏器官形成有影响。

依据光这种可归于气象类的物理生态动力源对植物这类生态动力汇作用的上述几种主要机理,可考虑从宏观、微观方面,调节光与植物的关系,使植物充分利用光能以为人类贡献更多的产品。而这种控制手段,则须以光学作为基础之一。主要调控措施这里仅论述以下两个方面。

1. 日照与引种

不同纬度与季节的光照长度不同,原产于不同地区的作物与品种具有不同的光周期性与感光性。所以在不同地区间引种时,要注意引入作物品种对光照长度的要求应与当地生长期的光照长度相适应。一般引种工作从光照时间考虑,应注意下列几点:第一,纬度相近地区之间,因光照长度相近,引种成功的可能性较大。第二,对感光性强的短日照作物而言,南方品种北引,由于北方生长季内光照时间长,将使作物生育期延长,严重的甚至不能抽穗与开花结实。为了能使其正常成熟,宜引用较早熟的品种,或感光性较弱的品种。反之,北种南引,由于南方生长季内光照时间较短,温度又较高,使作物加速发育,缩短生育期。如果生育期太短,会使植株矮小,将减低作物产量。第三,对长日照作物而言,北种南引,由于光照时间短,将延迟发育与成熟;南方品种北引则相反。从实际情况看,长日性作物的引种比短日性作物遇到的困难较少。因为如果不考虑地势影响,我国一般南方比北方温度高,长日性植物由北向南种,温度高使之加快发育,光照短使之延迟发育,光、温对发育速度的影响有互相抵偿的作用。南种北引类似。反之,短日性作物南北引种,光、温对发育速度的影响有叠加的作用,因而增加了南北引种的困难。

2. 光能利用率

目前,农业生产上光能利用率很低,其主要原因有:①光的漏射、反射和透射的损失。作物生长初期植株体小,地面覆盖率低,太阳辐射大部分射到地面。植株叶片较平展时,反射光多。叶片薄时一部分光能耗损于透射。②外界环境条件限制了作物光合作用能力的提高。高产栽培条件下,农田二氧化碳供应不足;作物生长初期和后期气温低,限制了光能的利用;水分供应亏缺和过剩,养分供应不足等,使作物不能正常生长,影响了光合作用的进行。③植物叶片光合能力的限制,叶片的光饱和点低,超过光饱和点的光能被浪费掉,且当群体结构不合理、叶面积指数超过适宜范围之后,限制了群体总光合强度的提高。④作物遗传特性的限制,小麦、水稻、大豆等 C_3 作物的光合效率通常比玉米、高粱等 C_4 作物低,在高温、强光和干旱的条件下,这一特性表现得尤为明显。此外,直立叶型的矮秆品种、抗逆性强的品种的光能利用率比散叶型或葡萄叶型的中、高秆品种、抗逆性弱的品种为高。

提高地区光能利用率的主要方法是提高单位土地面积的光能利用率和扩大复种指

数。其可行的途径有:①充分利用生长季节,适时早播,育种移栽,采取间套复种和轮作制度,合理安排茬口,创造适宜的农田群体结构。②培育高光效农作物品种,要求具有高光合能力、低呼吸消耗、株型、长相有利于田间群体最大限度地利用光能,提高群体的经济系数。③采取合理的栽培技术和措施。在不倒伏和不妨碍通风透光的前提下,扩大农田作物群体的叶面积指数,并维持较长的功能期,使之有利于作物光合产物的积累和运输。④提高植物体的光合效率。如抑制光呼吸作用,补施二氧化碳肥料和利用人工光源补充光照等。

下面让我们讲述光对动物和人的生态动力作用及生态控制意义。

光不作为动物的能量来源,它对动物的最基本意义在于空间和时间的定向作用。首先,光质中可见光对动物的生殖、体色变化、迁徙、羽毛更换、生长发育等都有影响。如春天生殖的鸟兽,光可促进其生殖腺机能活跃;把一种蛱蝶,在光照和黑暗的环境中,分别进行培养,则生长在光照环境中的蛱蝶,体色变淡,而生长在黑暗环境中的蛱蝶,身色发暗,其幼虫和蛹在光照与黑暗的环境中,体色也有与成虫类似的变化。另外,不可见光对生物也有多方面的影响。如昆虫对紫外光的趋光反应,紫外光有致死作用,能杀死致病微生物,抑制自然界的传染病原体。

光照强度对动物的生长发育和形态建成有重要影响。如蛙卵、鲑鱼卵在有光照条件下,孵化得快,发育也快;而贻贝和生活在海洋深处的生物,则在黑暗情况下长得较快;在有连续光照条件下产生的蚜虫多为无翅个体,在连续无光照条件下产生的也是无翅个体,但在光暗交替的情况下,则产生较多的有翅个体;动物在早晨开始鸣叫,与光照强度有直接关系:麻雀在光照 $0.2 \sim 45 \text{ lx}$ 开始鸣叫;蚱蝉在夏季气温达到 14°C 以上且光照 $0.8 \sim 6 \text{ lx}$ 时才开始鸣叫。

光照时间对动物的繁殖有着不同的作用,因此人们依据动物繁殖与日照长度的关系,把动物分成了长日照动物、短日照动物和中间型动物。生活在温带地区和高纬度地区的鸟兽属于长日照动物;山羊和鹿类只在白昼逐渐缩短的秋冬之季,性腺才开始活动,它们属于短日照动物;而珍珠鸡只要食物充足、温度适宜,不论光照长度如何,均能繁殖,所以它们属于中间型动物。

光对人体的活动也有重要的生态作用。维生素 D 是光对代谢生理起生态作用的一个典型。经过短波光的照射,7-脱氢胆固醇在皮肤中转化为胆钙化醇,如果照射在皮肤上的阳光不足,就不发生这个转化过程。缺乏维生素 D,骨骼的骨化不完全,儿童就会患佝偻病,因此,在冬季漫长而黑暗、夏季紫外线辐射较低的北纬的中高纬度地区,容易发生佝偻病,而在太阳辐射很强的热带地区就不容易发生。黑种人在北纬的中高纬度地区易患佝偻病,因为皮肤色素阻碍阳光射入,使转化为维生素的前期过程受到阻碍。相反,白种人在热带受到阳光的强辐射后会有过度骨化的危险。

根据光对动物生态作用的一般原理,人们可以从生态动力源汇两个方面或它们二者的结合上对牧业、卫生等方面的生态控制加以深入具体的研究,以便合理地进行调控,尤其是应用现代控制理论及控制论中其他系统方法的研究,目前似乎尚很不足。我们相信,随着人们对光生态认识的加深及其对物理学中光学基础问题的进一步认识,这方面的调控原理会更完善。

四、原子物理作用

原子物理对生态的作用,直到近年提到比较重要的位置。其原因不在于人们不重视原子武器试验和放射性物质辐射对人类环境的破坏作用,而是因为绝大多数人在平时很少接触到这方面的事件。作为生态课题加以研究,能获得的资料很少,投入资金较多。所以,像关于核武器试验对大气环境影响这一原子物理方面的生态动力源问题,直到 20 世纪 80 年代才引起科学界的关切;而 1986 年发生的放射性污染对鱼类的影响,到 1999 年才总结出论文,但该项研究确引起重视,被刊登在英国出版的世界科学权威杂志 *Nature* 上。

1. 核武器的生态威胁

在 80 年代,据报道,当时美国和前苏联共拥有 5×10^4 个核弹头,其总威力达到 150×10^8 t 的 TNT 烈性炸药的爆炸力。如果这些核弹头全部爆炸,就会使大量的放射性尘埃卷入大气层中,大量烟尘、放射性物质散布于空中。这些东西会遮蔽太阳光线,使天空变得昏暗。在地球表面上,由于极大地减少了作为一级生态动力源的太阳辐射,地面温度将会急剧下降。直到陆地表面温度常年维持在 0°C 以下。那时,整个大地就会失去春季,即温度按候平均(下同)在区间 $(10^\circ\text{C}, 22^\circ\text{C}]$, 失去夏季, $(22^\circ\text{C}, \infty)$, 也失去秋季 $[22^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C})$, 处于冬季 $[10^\circ\text{C}, -\infty)$, 而且是严冬(因为温度低于 0°C , 远低于 10°C)。这正是科学界所假定的令人吃惊的“核冬天”。至今,世界规模的关于核冬天的讨论会,已举行多次。根据这一假设,作为核动力源的生态动力汇的人和动物,不只限于交战双方的目标区内,而且波及全世界。当然,这是一种假设,尽管尚有许多待研究的细节,但它毕竟为人类避免成为核大战的受害者而敲响了警钟。

2. 放射性尘埃危害之例——切尔诺贝利尘埃对鱼的污染

放射性核污染事件,重要的有两次。其一是 1979 年 3 月 28 日美国三里岛核电站事件。另一次是 1986 年 4 月 26 日乌克兰切尔诺贝利核电站事件,致职业人员死亡 31 人,致辐射病 237 人。直接伤亡人数虽不太多,但造成水污染及对动物的危害是长期的。

放射性水污染,系通过放射性物质(放射性核素)的衰变而放射出一些射线,能使作为生态动力汇的各种生物含人体组织电离而受到损伤,从而引起放射病。水中的放射性污染主要有:天然放射性核素;核武器试验的沉淀物;核电站或核潜艇发生事故造成的核泄漏;核工业、核农业、核医学试验等产生的带有放射性物质的废水、废气、废渣;放射性同位素生产和应用造成的污染;非核工业试验或生产中排出的含有放射性物质的废水和废物。

水中放射性核素可以转移到水生生物和粮食、蔬菜中去,对人体造成损伤。人体对辐射最敏感的是增殖旺盛的细胞组织,如血液系统和造血器官(红骨髓、淋巴组织)、生殖系统(睾丸、卵巢)、胃肠系统、眼睛的水晶体、皮肤等。射线引起的远期效应主要包括:白血病和再生障碍性贫血、恶性肿瘤、白内障等。

放射性尘埃对动物的影响的时间是很快的,也有在事件后多年的很长远的影响。在 1999 年, B. Jonsson 在英国出版的 *Nature* 杂志发表了关于切尔诺贝利(Chernobyl)放射性尘埃对鱼类污染作用的论文,指出:1986 年切尔诺贝利核泄漏事故发生后,鱼体内 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 含量在迅速降低,估计半衰期为 $0.3 \sim 4.6$ a。用仪器检测了受切尔诺贝利放射性尘埃污染的鱼类的放射性 Cs 含量,分析了近 4000 种鱼的样本,从春季到秋季,连续追踪

2~4 a, 被研究的鱼种中最有代表性的鱼种有鳟(*Salmo trutta* L.) 和红点鲑(*Salvelinus alpinus* L.)。结果显示:起初3~4 a内放射性铯快速下降,然后,下降速度放慢,估计8~22 a半衰期内,放射性约减少10%,1986年, ^{137}Cs 的最高含量,鳟为 $10468 \text{ Bg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远大于红点鲑($3097 \text{ Bg}\cdot\text{kg}^{-1}$),鳟和红点鲑的变率分别为90%和92%。据推断:鳟的半衰期,第一阶段和第二阶段分别为0.6 a和7.7 a;而红点鲑的相应值分别为1.1 a和22.4 a。鳟和红点鲑,在第二阶段, ^{137}Cs 的初期活动峰值分别为1.5%和10.7%。环境中Cs含量可作为一种近似的稳定量,推断衰变结果。放射性Cs在鳟和红点鲑内累积和衰变的模式,可用于其他生态小生境评价之中。

放射性尘埃对生物影响的研究,显然说明原子物理学中关于同位素放射性理论是以放射性尘埃为生态动力源以动物为汇的生态动力理论的基础,而为了更好地了解有关生态控制可能手段以最终达到优化控制之目的,须作更多研究。随着原子能利用和核工业发展,这类研究将更有必要。

第三节 生态控制的化学基础

化学是研究物质的组成、性质、结构、能量相互转化及其变化规律的一门自然科学,无论是生物体和非生物体都是由化学元素组成的,这些元素以原子、离子、分子形态组成物质。在《生态动力学》一书中,作者在阐述生态动力源概念并对其分类的时候,从物质运动的几种根本形式出发,把化学类生态动力源作为生态动力源的一个大类。由于生态控制的实质是调节控制生态动力源,所以用化学方法的控制措施,必然涉及到其化学基础的问题。本章从环境化学开始说明化学对生态控制的基本原理,再论其在宏观和微观生态控制中的作用概况并结合一些实例论述。

一、环境化学——基础化学与生态控制的桥梁

作为化学的一个分支的环境化学近年引起人们的重视。这包括:①环境化学和生物效应、毒理学结合的问题:1996年,国际环境毒理学和化学学会第七次大会的报告反映了环境化学和生物学关系研究的进展。②多介质复合化学体系的综合研究:土壤环境是一个复杂的多介质体系,化学污染物在土壤体系中的环境行为,对土壤和地下水的保护都有重要作用。③水沉积物环境化学的研究。④大气环境化学的研究。⑤清洁生产中的环境化学研究。

环境化学因其研究化学物质在环境中运动的规律和控制原理,所以只要同生物结合,就必然引出生态学问题,而要合理认识和解决这些问题,就必然涉及优化控制。这正是环境化学成为生态控制主要基础之一的根本理由。下面,我们就人们关心的几个生态控制问题,具体阐述。首先,我们论述全球环境中化学成分变化的影响。如所周知,全球环境由大气圈、水圈、岩石-土壤圈和生物圈组成,这四个圈层构成了一个相互作用的大系统。关于各圈层内及圈层间作用的化学问题、生态控制,下面分别简述。

1. 大气圈化学成分及其优化控制

大气中某些微量成分能够吸收太阳辐射中的红外光,这些成分主要有 CO_2 , O_3 , H_2O , CH_4 , N_2O 和氟利昂等。这些成分在大气中能停留较长时间,使大气增温。大气中的 CO_2 受到人类活动影响而增加,据研究其浓度的年增长率为0.4%。

大气中的甲烷(CH₄)也是一种重要的温室气体,这是因为 CH₄有强烈的红外吸收和辐射作用,甲烷吸收和发射谱带的区域在长波范围内,而在这个区域,CO₂和水汽不吸收(即所谓的窗口区域),因而有浓度增加的趋势。近年来,王明星等研究甲烷的源和汇,取得大量数据,给出 CH₄源排放总量和未来变化趋势(见表 2-1)。

表 2-1 中国主要 CH₄源排放总量及未来趋势

排 放 源	排放总量(10 ¹² g·a ⁻¹)	
	1988 年	2000 年
稻 田	17±2	17±2
家 畜	5.5	8.5
煤 矿	6.1	8.0
天然湿地	2.2	2.2
农村堆肥	3.2	3.2
城 镇	0.6	0.6
总 计	35±10	40±10

对于其他气体研究,也取得了许多成果,此不详述。

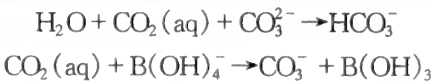
为了优化控制全球大气圈中 CO₂等温室气体的排放,近十多年来,人们已采取了许多措施,最主要措施,是以国际协议、条约的法律手段,限制工业废气向大气中排放。这是通过微观活动达到全球大气优化这一目的的有力控制生态环境手段。

2. 水圈

覆盖在地球表面的大量的水是地球生命支持系统之一,它在地球气候调节和生物地球化学循环中起着十分重要的作用。正如生态动力学中对水文生态动力源的作用所估计的那样,水文生态动力源是关系到农业和人们生存的命脉。对其中化学成分的调节,须以对水的化学成分的正确认识为前提。淡水的化学成分受诸多因素的影响,其一般特点是:离子强度较低,一般为 10⁻²~10⁻³mol·L⁻¹,pH 变化范围较大,一般为 7±3;淡水中主要的离子有:Na⁺,Mg²⁺,K⁺,NO₃⁻,SO₄²⁻,Cl⁻以及 HCO₃⁻,它们的含量都是可变的;河流和湖泊中悬浮物和含量,变化较大。

海水的化学成分有以下特点:具有较高的离子强度,一般约为 0.7mol·L⁻¹;公海中盐的浓度变化不大,一般为 32.0~37.5‰;海水的 pH 变化不大,一般为 7.5~8.3,集中于 7.8~8.2;海水中的主要离子有 Na⁺,Mg²⁺,Ca²⁺,K⁺,Sr²⁺,Cl⁻,SO₄²⁻,Br⁻以及 F⁻,其含量较稳定;颗粒物浓度比较恒定,有机碳颗粒物通常占 30~50%。

水生生态系统,尤其是海洋生态系统,在全球碳循环中发挥重要作用,能有效地缓解 CO₂浓度增加所引起的温室效应。由于海洋持有的碳比大气多 50 倍(其中大部分是以 CO₃²⁻和 HCO₃⁻离子形成存在),所以它对 CO₂的吸收能力是很强的。这种吸收能力取决于溶解的碳酸盐和硼酸盐的离子数量,其反应的化学式为:



在淡水生态系统(湖泊、水库和河流)中,碳的主要形式含溶解的无机碳(DIC)、溶解态有机碳(DOC)和生物体有机碳(BOC)。这三种形式的碳同时在不同的水体中的比例,主要取决于碳的沉积、代谢利用和无机碳化学成分等因素。在人类生产活动作用下,在

淡水生态系统中,尤其在水库中,碳的存贮量是增加的,据 Meybeck 估算(以 $10^2 \text{ gC} \cdot \text{a}^{-1}$ 为单位):水库中碳贮存量,1850 年为 0,1993 年为 100,预计 2050 年为 200;人类向海洋直接输入的 TIC,1850 年不足 20,1993 年为 40,预计 2050 年为 80 以上。认清淡水生态系统可能受到进一步污染威胁这一严峻形势,有利于人们依生态控制原理,自觉控制向水中排放污染物,使水体保持生态平衡,以利优化环境,服务于可持续发展。

3. 岩石-土壤圈

岩石圈是构成地球系统的基本圈层之一。岩石圈的表面自然体包括风化壳和土壤,土壤是地球表面生长植物的疏松层,它以不完全连续状态存在于陆地表面,有时亦称土壤圈。该圈与农林牧业方面的人类活动生态动力源关系密切。

与生态控制化学基础有直接关系的内容,主要包括:

(1)土壤矿物质成分

土壤矿物质是土壤的主要组成部分,按其成因可分为原生矿物和次生矿物。土壤中各种化学元素的最初来源是原生矿物,它们分为硅酸盐类、氧化物类、硫化物和磷酸盐。次生矿物包括简单盐类、水合氧化物和粘土矿。土壤中次生矿物对土壤物理化学性质有很大影响。

(2)土壤的主要化学性质

土壤是一个复杂的体系,它由气、固、液三相组成。土壤胶体具有巨大的表面积和表面能,胶体粒子具有表面电荷。土壤的酸碱性一般分为九级,我国土壤的酸碱度一般在 pH4.5~8.5 的范围内(表 2-2)。土壤酸碱度在我国的地理分布规律是,由南向北通常逐渐增加。长江(北纬 33°)以南的土壤多为强酸性和酸性,长江以北为中性和碱性。如华南和西南的红壤、黄壤土 pH 4.5~5.5,华中、华东的红壤土 pH 5.5~6.5,而华北、西北土壤 pH 7.5~8.5 少数地区甚至可高达 10.5。

表 2-2 土壤酸碱度分级

pH	酸碱度级别
<4.5	极强酸性
4.5~5.5	强酸性
5.5~6.0	酸性
6.0~6.5	弱酸性
6.5~7.0	中性
7.0~7.5	弱碱性
7.5~8.5	碱性
8.5~9.5	强碱性
>9.5	极强碱性

土壤化学性质显然是人为控制化学类生态动力源的科学基础。我国多年来,在这方面所做的工作正是针对这个基础进行的。一方面,通过对土壤本身酸碱度的控制,比如改良盐碱地的措施,使土壤生态条件更好支持植物生长(如石元春、辛德惠两位院士在河北曲周所做的工作),另一方面,培育适应盐碱地环境的品种(如许雷研究员在辽宁大洼所做的工作)。

4. 生物圈与生物地球化学循环

生物圈,同前述三个圈层的不同之处,主要在于它并非构成一个单独的物理圈层,而

是地球上所有生命有机体的总和,它的大部分集中在水圈和岩石圈,也部分地生活在大气圈。

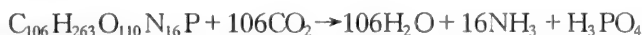
生物圈的代谢作用含同化作用(anabolism 或 biosynthesis)和异化作用(cotabolism)。前者进行物质合成,后者进行物质分解。

光合作用是同化作用中最主要和最基本的过程。Chameides 和 Perdue(1997)分别给出海洋和陆地生物的光合作用和呼吸作用的化学反应式。

海洋生物光合作方式



海洋的呼吸作用式



陆地生物圈的光合作用和呼吸作用反应式



在植物化学中,元素间的比值非常重要,它不仅反应植物对环境的适应情况,也能指示植物的生活型。一般来说,海洋生物的 C:N 和 C:P 值较小;陆地生物中,木本植物因含较多的木质素,故 C:N 和 C:P 值较草本植物大。

下面讲一下碳、氮、硫和磷的生物地球化学循环问题。

(1)碳循环

CO₂循环是生物地球化学循环的核心内容,是 CO₂在大气圈、生物圈和岩石-土壤圈中的积累和流动过程。据方精云研究,如果按大气 CO₂浓度为 $360 \times 10^{-6} \text{ml} \cdot \text{L}^{-1}$ 计算,那么大气中的碳量应为 750 PgC;而大气中的 CO₂浓度以 $1.5 \times 10^{-6} \text{ml} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率增加,故大气中的碳量每年增加 3.4 PgC。

土壤是个巨大的有机碳库,全球土壤碳库大约有 1500 PgC,中国土壤碳库在全球碳库中占重要位置。因此,保护中国土壤资源不仅对我国农业可持续发展至关重要,对维护良性的全球生物地球化学循环也是十分必要的。而科学保护土壤资源正是人类控制土壤生态的重要手段。

土壤呼吸是土壤释放 CO₂ 的过程,也是生物圈向大气圈释放 CO₂ 的主要方式之一。据研究,影响土壤呼吸的主要因素包括生物作用、土壤气象因子、抑制因子以及土地利用方式。其中土地利用是生态控制的人工措施,它直接关系到整个土壤呼吸过程。

化石燃料燃烧基本上全是人类活动的问题。煤、石油、天然气燃烧以及水泥生产等工业活动所释放的 CO₂ 是大气中 CO₂ 的主要来源。按照生态控制原理,采取必要措施,减少 CO₂ 排放量是人类保护环境的当务之急。对此问题,本节后面将专门讨论。

热带森林破坏,将使积累于林木中的 CO₂ 向大气中释放。因此保护热带森林,避免大规模砍伐和垦荒,对于减少大气中人工源 CO₂ 是很重要的。

(2)氮循环

N 是氨基酸的组成元素,是一切生命所必需的成分。近年,已有较好的全球 N 素循环模式。模式指出,大气是地球上最大的 N 库,陆地、土壤的 N 库小。大气中的 N 素固定对生物圈极为重要。闪电固氮、人工固氮、化石燃料燃烧固氮等是目前人们认识到的在陆地上的主要固氮方式。所固定的 N 素都是可以植物吸收利用的有效态氮,合计为 $240 \text{TgN} \cdot \text{a}^{-1}$,从陆地进入海洋为 $36 \text{TgN} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

在海洋系统中,除每年从陆地接收的 36 TgN 外,生物固 N 量为 $15 \text{ TgN} \cdot \text{a}^{-1}$,通过雨水接收 $30 \text{ TgN} \cdot \text{a}^{-1}$ 。深海是个巨大的无机 N 库,有 570 PgN。经由海洋的反硝化作用,每年有 110 Tg 的 N 素以 N_2 的形式返回大气。

(3) 磷循环

全球磷循环与其他几种元素循环的一个显著区别是几乎没有气体成分参与磷循环。近年,全球磷循环模式已经建立。据计算陆地生物体中的 P 库中,磷的总量为 26000 TgP。海洋生物体中,P 的总量为 44 TgP。表层海洋和深层海洋的 P 库分别含 2800 TgP 和 100000 TgP。

(4) 硫循环

地球大气中的 S 主要来自火山爆发、沙尘以及某些人类活动。从火山进入大气的硫约为 $10 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$,其中,海洋和陆地各为 $5 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$,由沙尘带入大气的硫为 $8 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$ 。化石燃料燃烧排放的 S 为 $90 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$ 。另外,陆地生态系统中,也自然释放出一部分以 H_2S 为主的气体,其总量不超过 $1 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$,加上森林火灾释放的 $3 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$ 的硫化物,可知,从陆地生物圈向大气排放的 S 约为 $4 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从陆地排放到大气中的硫,大部分以干沉降和雨水吸收的形式又回到陆地,剩余的部分经远距离传输到达海洋。在海洋的 S 循环中,海洋生物排放的 S 约为 $16 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$,而海洋吸收的 S 为 $180 \text{ TgS} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(5) 化学元素循环与生态控制关系

掌握地球化学元素的循环规律及其相互作用,对于人类设法适应这种规律,在认识这种规律基础上,通过人工生态动力源的调节、控制,使这些循环朝着人类需要的方向发展。方精云等从复合生态系统的观点,结合中国国情研究元素循环规律,有助于生态环境中化学元素的能动控制走向系统化,这是架起化学与生态控制间桥梁的有益尝试。如所周知,在复合生态系统中,人是最活跃的积极因素,也是最重要的破坏因素。因而该系统兼有自然与社会双重属性。

为使元素循环有益于可持续发展,从全球,从陆地或海洋各自总体,以至从大区域总体考虑宏观措施;另一方面,在局部地区范围内,考虑具体措施,两者相辅相成。据研究,近年国内实用有效的措施为:提高农田土壤中的 P 和 N 的利用率;在湿地建设或天然湿地改造过程中,注意截留 P 和 N,比如利用《生态动力学》一书中湿地 P 模式作指导;利用农林牧生态系统固定 CO_2 ,减少向大气中的 CO_2 排放量;发展生态产业体系,多级利用废物。

二、化学元素宏观生态控制

1. 温室气体控制——大气中化学物质全球控制

控制温室气体排放是人类在认识到 CO_2 等温室气体的前提下自觉使用的一项全球统一行动的大规模的生态控制措施,是当今对大气化学元素作宏观控制的有效手段,它起源于人类活动所形成后果的深刻教训。

(1) 背景

大气中的水汽、二氧化碳和其他温室气体,如甲烷、臭氧、氟里昂等,可使太阳短波辐射几乎无衰减地通过,却可以吸收地球的长波辐射。这类气体有类似于温室的效应,所以把它们统称为“温室气体”。大气中能产生温室效应的气体已被发现的近 30 种,其中

CO₂、甲烷、氟里昂和氧化亚氮起重要作用。

据研究,大气中 CO₂ 增加的主要原因是森林砍伐和化石燃料的燃烧,“温室效应”使地球表面温度提高,从而给生产和人类活动带来影响,乃至造成全球不良后果。

据李星学院士介绍:全球大气中 CO₂ 含量,在 1750 年以前,基本维持在 $280 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,1890 年为 $290 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,1960 增至 $315 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,增加率为 8%,平均每年增加 $0.6 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$ 。1958 年以来的监测结果表明,1981 年已超过 $340 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,相当于每年增加 $1.3 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,到 20 世纪末已升至 $360 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,每年约增加 $1.8 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$ 。CO₂ 体积分数剧增会导致气候变暖,或者确切地说是人类活动导致气候变暖,许多学者曾预测:如果世界能源消费的格局不发生根本性变化,到 21 世纪中叶,大气中 CO₂ 的体积分数将会达到 $560 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,地球平均温度会有较大幅度的增加。政府间气候变化专业委员会(IPCC)于 1996 年发表的评估报告,再次肯定了温室气体增加将会导致全球气候变化的预测意见。

人类活动极大地改变了土地利用方式,特别是工业革命以来,大量森林植被遭到破坏,化石燃料使用量迅速增加,人为的温室气体排放量大量增加。

(2) 控制计划与实施

1988 年联合国环境署(UNEP)和世界气象组织(WMO)联合发起成立政府间气候专业委员会。1992 年 6 月,154 个国家在里约热内卢举行的环境与发展大会上签署了联合国《气候变化的框架公约》。这是原则性公约,它对国际社会应对气候变化加强合作提供了法律依据,从生态控制角度出发,是人类自觉地调整自身行动控制化学生态动力源的全球范围的重大举措。该条约签订旨在控制大气中 CO₂,CH₄ 和其他温室气体的排放。它于 1994 年 3 月生效,至 2001 年有 186 个缔约方,我国是 1992 年首批签约国。

自 1995 年柏林会议起,每年举行一次缔约方大会,就公约的具体实施等问题进行审议,对有关问题进行进一步谈判。1997 年 12 月,在日本京都举行的第三次缔约方大会期间,与会国家共同审查了《气候变化框架公约》执行情况,磋商如何采取措施,以落实该公约,使发达国家在更有效地降低温室气体排放量的同时,增加对发展中国家的资金援助和技术转让,从而尽快地抑制全球气候变暖趋势,这次会议达成的协议即《京都议定书》,是国际社会为保护人类赖以生存的地球环境经多年努力而达成的一项重要成果。从科学上讲,是化学、气象学的多年研究成果用于人类控制全球生态环境实践的尝试。这一具有国际法律效力的文件规定:39 个工业化国家在 2008~2012 年间,将温室气体排放量在 1990 年的基础上减少 5.2%。所限制的温室气体主要有 CO₂,CH₄,N₂O,氢氟烃、全氟化碳和六氟化硫。京都协议的制定,是全球协作为改变大气中 CO₂ 等气体含量所作努力的第一步。但实施该协议,仍有许多问题尚待解决。

2. 酸雨控制

如果说《京都议定书》是全球生态问题宏观控制重大战略举措,那么酸雨控制是大范围宏观控制的重要战术举措。

(1) 酸雨及其危害

酸雨,在今天已成为科学界熟知的一个术语,一般说来,pH 小于 5.6 的雨、雪或其他形式的大气降水统称为酸雨。酸雨是由人为排放到环境中的 SO₂ 和 NO_x 转化的硫酸雨和硝酸雨而形成的。

酸雨引起的污染,已成为当今社会的重大公害之一。大量事实表明:酸沉降对陆域及水域生态系统、材料及露天文物古迹,对人体健康,对工农业生产,都会产生不同程度的不利影响。

酸雨,从本质上说,是经由大气运动“加工”作用的大气污染的一种形式。酸雨的化学成分有一定的地区性。比如,在我国由于能源构成中煤占 76%,而煤炭的 84% 供直接燃用,而直接燃用的煤中粉煤量高达 60% 左右,所以大气中 SO_4^{2-} 对 NO_3^- 的比值比美国高得多,这说明我国酸雨是典型的硫酸雨。每年排入大气的污染物的化学成分中,有 87% 的 SO_2 和 67% 的 NO_x 来源于煤炭。酸雨对森林生态系统的危害是长远的。比如,有局地特征的峨眉山酸雨系来自四川盆地的成都一带,这种酸雨严重危害峨眉山冷杉林、酸雨不但使森林受损,还使森林调节环境的功能下降。对农田生态系统的危害主要通过土壤促成的。我国土壤的化学性质,区域分带明显,土壤的 pH,阳离子交换量,盐基饱和度,大体上自南向北逐渐升高,土壤对酸沉降的忍耐能力,大体上自南向北逐渐升高,地表水体的酸缓冲量从南向北逐渐增大。这些化学特征,对于了解酸雨和控制酸雨是有益的,是酸雨生态控制的主要科学基础之一。

为了保护生态环境,目前世界上越来越多国家着手寻求有效的科学途径来规划并控制酸性物质排放量。早期,有经验方法、离子平衡算法、酸化模型法和湖泊再现法。目前,郝吉明等在确定酸沉降临界负荷与临界化学标准,研究酸沉降计算方法和酸化模型基础上,作了全国性的地理区划,并制定了在临界负荷基础上控制酸沉降的方案。具体措施诸如:限制高硫煤的开采和使用;重点治理火电厂污染,削减 SO_2 排放总量并防止化工、冶金、建材(尤其是水泥)等行业排放所引起的 SO_2 污染。

(2) 控制区选择及控制效果

一般说来,酸雨控制区应包括酸雨最严重的地区及其周围 SO_2 排放量较大的区域,而 SO_2 污染主要集中在城市,污染的主要原因是局地大量的燃煤设施排放的 SO_2 ,所以在确定二氧化硫污染控制区时,应以城市为基本控制单元。

在我国,考虑到酸雨和 SO_2 污染特征的差异及实施可持续发展战略的要求,1988 年 1 月国务院批准“两控区”总面积为 $1.09 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 11.4%, 其中酸雨控制区面积约为 $8.0 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 8.4%; SO_2 污染控制区面积约为 $2.9 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 3%。目前,“两控区”酸雨化学污染的防治已见成效,数千家不合要求的高硫煤矿已被关闭,也关停了会造成污染的小水泥、小玻璃和小钢铁生产线千余条。

三、微观生态控制

从化学原理出发,研究化学生态动力源对生态环境影响并用化学方法进行防治或优化控制,是离不开化学基础的。这部分讨论微观生态控制,一般是通过人类活动采取某种措施可望在当时(或近期)当地见效的措施。

1. 水污染及其化学控制

水体富营养化是水污染的主要表现。在人类活动影响下即在人工生态动力源作用下,各种生物所需的 N, P 等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等流动缓慢的水体,引起藻类与其他浮游生物迅速繁殖,水体溶解氧量下降,水质恶化,水中的鱼类及其他生物大

量死亡,这就是水体富营养化。

富营养化使水的透明度降低,以致阳光难以穿透水层,从而影响水中植物的光合作用,影响 O_2 的释放;而表层水面植物的光合作用,可能促成溶解氧的过饱和状态。表层溶解氧的过饱和,水中溶解氧少,都有害于鱼及其他水生动物,甚至其死亡。富营养化水体中底部堆积的有机物质在厌氧条件下分解所生成的有害气体以及某些浮游生物所产生的生物毒素,都会成为有害于水生动物的生态动力源。富营养化的水中含有亚硝酸盐和硝酸盐、人畜长期饮用其含量超标的水,会中毒致病。

水体需氧物质污染,一般以总有机碳、生化需氧量和化学需氧量为指标。水中有毒物质污染,直接危害人体健康,导致若干种疾病,也是地方性中毒的原因,并有害于水生动物。

为了减轻乃至避免水富营养化等化学生态动力源的负生态动力效应,人们依托现代科学技术采取一系列措施,包括净化和废水处理措施,这里只介绍与化学有关的主要措施。化学净化过程中的化学反应的产生和进行,取决于污水和水体的具体状况。如在一定条件下,水体中难溶性硫化物可以氧化为易溶性的硫酸盐;可溶的 +2 价铁、锰的化合物可以转化为几乎不溶解的 +3 价铁、+4 价锰的氢氧化物而沉淀下来。又比如水中的硅、铝的氧化物胶体或蒙脱石、高岭石一类胶体物质,能吸附各种阳离子或阴离子而与污染物凝聚在一起并沉淀下来。

废水的化学处理方法系指利用化学反应来分离、回收废水中的污染物,或者把这些污染物转化为无害的物质。主要的工艺中有中和、混凝、化学沉淀、氧化还原、吸附和萃取等。

2. 土壤污染及其化学控制

土壤作为生态动力源的一个大的类别是污染物迁移转化最为频繁最为复杂的场所。大气和水是污染土壤的媒介。

土壤是植物赖以生存的基础,而土壤的化学成分对农作物的作用更重要,这也许是在农业科学中土壤与农业化学往往列为一个专业的缘由!土壤污染物可直接或间接地影响土壤的生态动力过程,产生负效应导致农作物产量和质量降低。我们可以毫不夸张地说,土壤污染若不及时卓有成效的治理,就会成为两高一优农业可持续发展的桎梏。

土壤污染的几个主要问题

①重金属污染 Hg, Cd, Cr, Pb 等重金属是土壤的重要污染源。重金属污染毒性效应强,重金属难于被微生物降解,并且有可能在微生物作用下,转化为更有毒的物质,如无机汞经微生物作用而生成有机汞。土壤中的重金属离子可以被农作物吸收,经由食物链浓缩千万倍,在人体中积累以致中毒,成为人类生存的潜在的重大威胁之一。

②农药污染 农药是土壤的一种重要的污染源。农药包括杀虫剂、杀菌剂、除草剂、生长调节剂等。农药对害虫、真菌和杂草的杀灭作用,可为农业挽回 15% 的收成。但是,农药利用率只有 10%,其余或直接散落在土壤和水体中,或通过作物落叶、降雨的作用而进入土壤中,有些农药难于降解,长期存入土壤中,也可经由食物链进入人体。

③固体废弃物污染 固体废弃物通常指没有利用价值的固体或半固体物质。固体废弃物含工业废弃物、农业废弃物和生活垃圾。固体废弃物对土壤污染十分严重,因为它可侵占农业,其中的有害气体逐渐挥发到大气中去,污染空气;其中所含有毒重金属和其他污染物,经雨水淋洗可污染河流湖泊、地表水、地下水和土壤。在农业生产中,由大

棚、日光温室和地膜淘汰下来的塑料薄膜,散入农田混入土壤,阻碍土壤中空气流通,影响植物根系发育、呼吸,不利于土壤微生物繁殖,也影响土壤中水分和肥料的迁移,混在土壤中的塑料薄膜,通常要经 200 多年才能分解完毕,可见对农田生态负面影响之长远。

④化肥污染 化肥的施用,在促进农业增产的同时,也会造成土壤、大气和水体的污染。化肥施用可造成土壤板结,如长期施硫酸铵可造成土壤中硫酸根离子富集,土壤酸性增强而生成硫酸钙,使土壤板结。氮肥的施用可导致土壤中的硝酸盐和亚硝酸盐大幅度增加,污染各种农作物,特别是蔬菜、水果和瓜类。施用化肥还污染地下水,使地下水含有过量的硝酸盐和亚硝酸盐,人和动物饮用后,也可在体内生成对健康有危害的亚硝酸铵。可见化学污染土壤导致负生态动力效应不可忽视,要设法解决。

既然土壤污染从多方面影响生态环境,人们必须从生态控制的化学基础出发,采用标本兼治的措施,予以有效的预防和治理。

预防措施中的化学措施主要是合理使用农药。注意农药的量和质。首先要控制农药的施用量。其次要淘汰毒性大、残留量高而在环境中影响时间长,造成危害大的那些种类的农药;第三,要严格控制农药的使用范围、次数和总用量。要保护好人类的朋友暨害虫的天敌——益鸟、益虫和益兽。

合理施用化肥也是以化学科学为基础的防治土壤污染的一种有效措施,一般提倡施用腐熟的有机肥料,合理使用硝酸盐类和磷酸盐类肥料,合理施用氮肥,注意选择施用硫酸盐和硫酸盐类的化肥,避免和减轻土壤板结与污染。

对已受化学污染的土壤要加以治理,一般都要多年努力,坚持不懈。其治理措施很多,大都与化学基础有关。对于轻度污染防治的化学措施主要有:增施有机肥,可以提高土壤的胶体作用,增强土壤对农药和重金属的物理化学吸附和吸附-催化水解的能力;有机质本身还是还原剂,可使部分离子还原沉淀,成为不可给态;有机质有利于微生物繁殖,提高生物的去毒作用。加强水浆管理对被重金属污染的土壤来说,是治理的有效措施。土壤中发生的氧化还原反应能控制土壤中重金属的迁移转化。在淹水情况下一定时间后土壤呈缺氧状态,厌氧性微生物活跃,分解有机物产生大量 H_2S 。土壤中的 Hg , Cd , Pb , Zn 等重金属离子可与 H_2S 反应而生成不能溶于水的硫化物并沉淀下来,减少了植物对重金属的吸收量。此外,改革耕作制度,施加抑制剂等都是治理轻度污染中与化学基础关系密切的措施。

重度污染的化学治理多为治本措施,如深翻改土,即将被污染的表层土壤翻到 30cm 以下那些植物根系达不到的深层,再加施有机肥料。这种方法对小面积,尤其有效。在日光温室生态研究中可这样做。植树造林可用于大范围土地,选用抗污染性强树种来种植树木,充分发挥树木改良土壤作用,无论对于用材林,还是薪炭林,都可以这样做。

四、化学生态控制与农业生态优化

化学生态控制最直接应用对象是大农业生产中关系到化学的问题。在前一段,主要从污染方面讨论了化学基础的问题,其生态控制手段可以说旨在抗逆;而另一方面,发挥化学基础的优势,促进生态农业进步,走农业可持续发展道路,也是生态控制依赖化学走向优化的重要一步。鉴于这方面内容十分广泛,这里只就土壤化学和有关替代农业中的化学基础加以简述。

1. 土壤化学物质生态功能及其优化控制

土壤 pH 对植物生态有着直接和间接的作用。pH 直接影响植物和代谢,土壤过酸过碱都会引起酶和蛋白质的钝化和变性;土壤酸度通过影响矿质盐分的溶解度和微生物的活动,间接影响植物对养分的吸收;可以利用寄主生物对 pH 的不同反应,以控制植物病害。比如说,十字花科植物猝倒病病原菌(*Pythium aphanidermatum*)病菌发生于酸性土壤中,通过试验营养土配制,注重其 pH 测定,可避免猝倒病的再次发生。

土壤 pH 对动物也有较大影响,据调查,半沙漠的灰钙土、沙土和盐渍土,往往由于过酸或过碱,或盐度高,土壤动物也贫乏。

土壤有机质来源于绿色植物、土壤动物、微生物,它可以调节土壤理化性质,同时也是植物 N、C 等营养元素的来源。

土壤矿质元素是植物生命活动的重要基础,源于土壤矿质的微量元素也是动植物必须的。

2. 其他化学控制与农业生态优化

从化学基础出发,调节生态动力源,以利生物的生长、发育和产量形成,在这里有两点值得提倡,一是注意学科交叉,比如在《生态动力学》一书中所介绍的施肥措施与天气的关系,实际上是从化学生态动力源和汇的关系出发,结合物理性质的生态动力源的措施,提高肥效不限于肥料本身。在这方面,前苏联和今俄罗斯有多项研究值得借鉴。在我国半干旱半湿润地区曾运用了旋转回归等确定施肥量、施肥配方,运用数值天气预报产品研究合理施肥时间,使追肥与雨水配合,提高肥效。另一方面,是现代试验技术和多种系统方法的应用。王元院士和方开泰研究员将均匀设计用于施肥,收到良好的效果。

发展有机农业,对于化学生态控制,可以说是百年大计。我国早期的传统农业,实际上是现代有机农业的一个历史渊源。所谓有机农业原指一种完全不用或基本不用人工合成的化肥、农药、生长调节剂和家畜、禽、鱼虾饲料添加剂的农业生产体系。这种农业实质上依靠轮作、秸秆、粪肥、绿肥等,以保持土壤肥力和耕性,尽可能用生物防治杀灭病虫、抑制杂草。按照有机农业倡导者的说法,土壤是一个有生命活动的系统,其养分平衡及性状改良是促进农业可持续发展的基础。而土壤的化学性质的优化正是离不开化学基础的。

国外提倡的替代农业范畴的“自然农业”、“生物农业”和“生态农业”与有机农业并列,有许多措施直接关系到化学基础。比如“自然农业”中提倡不施化肥,不用除草剂,不用化学农药,是为作物长远着想,避免化学农业副作用,而作物生育所需化学生态动力源在客观上仍得到满足。如日本富冈正信按照自然农业方式实验 30a,其产量与一般的农业接近,同时确保可持续发展。

农业生态优化的现代技术中的化学优化控制,也是同系统控制方法相联系的。由于这部分讲述基础,不可能很具体,但本书后面几章中的许多系统方法,都可完全用于农业化学优化控制。比如第九章介绍的人工智能技术、专家系统、模式识别,均可用于像施肥、用药、家畜饲料配方之中。而像决策、博弈、Monte Carlo 方法,用于化学方面的农业调控比用于气象、水文调控要容易些。

五、人类健康、生活环境与化学生态控制

现代科学研究证明,生命过程本身是大量化学变化的结果。在研究人以及生物的生

命物质和生命活动规律的领域里化学不仅提供了技术和方法,而且提供了理论基础。标准人体含 46 种化学元素,它们可分为必需元素、非必需元素和有毒元素三大类。从有机化合物来说,有糖类、脂肪、蛋白质、酶。近年,人类基因组计划的进展和基因工程的成果,为人类优化控制食品、防污染、防病和增进健康水平打下了必要的科学基础。

1. 食品污染及其化学控制

食品污染指食品在生产、加工、运输、储藏、销售和烹调过程中,混入或产生某些不良化学物质和致病微生物,使得食品含有对人体有害的毒素,引起人体不良反应的过程。其中与化学有直接关系的是食品的化学性污染,污染很广,包括农药、化肥、重金属、多环芳烃、亚硝铵、杂环芳烃、二噁英等。

为了优化控制食品污染、净化营养生态动力源,人们在以往经验和研究成果基础上,明确了预防方向。首先改进传统烹调方式,提倡蒸、煮,减少煎、炒、炸、烤、熏。这些措施有其化学科学依据。其次,树立科学饮食习惯,包括饮食清淡、多食新鲜蔬菜,多用绿色食品和有机食品。

2. 居室化学污染及其控制

在现代人居的环境中,室内空气污染物来源多,危害大。据美国环保局调查,室内空气污染的严重程度是室外的 2~3 倍,在某些情形下,甚至高达百倍。室内污染源有:生存污染,人通过呼吸道、皮肤汗腺排出大量污染物,呼出 CO_2 、水汽,散发出病原菌,在人员聚集场所,会更严重。厨房排放出的化学元素,诸如多环芳烃、杂环芳烃、氮氧化物、一氧化碳等。卫生间污染的 H_2S 等会引起结膜炎疾病。家庭装修材料,比如板材可长期连续释放甲醛,危害人体健康。

通风换气是排出室内空气污染物的最有效措施之一,保持室内卫生,还可利用植物的生化措施,比如绿色花卉能吸收 CO_2 、吸附飘尘,吊兰、芦荟可吸收甲醛,长春藤、铁树、葡萄可吸收三氯乙烯等。

第四节 生态控制的地学基础

生态控制与整个地球科学的关系是很密切的,地球科学的整体及其各个主要分支,诸如自然地理学、地貌学、气象学、土壤学、水文学、地质学、地球物理学、地球化学、海洋学等作为生态控制原理的主要基础学科,涵盖着主要类型的生态动力因子。事实上,在生态因子中除可归为生物类型的生态因子外,所有其他的自然生态因子——气象类、水文类、海洋类、土壤类、地貌类的生态因子——的学科范围都在地球科学之内。而人类活动生态动力因子,大都与地球科学有关。为在本节说明地球科学在生态控制中的作用,不必按地球科学的具体学科一一论述,而进行综合说明并抓住因子的基础、控制的途径、方法的借鉴、资料的共享四个问题。

一、因子的基础

这一部分,主要论述两个方面的问题,即自然资源与自然灾害各自的生态—地学的分析与综合。

1. 生态—自然资源的控制

任何自然资源的发现和发掘,其目的都在于为人类服务,这包括以各种自然资源直

接为人类本身服务,也包括以资源服务于动物、植物和微生物,以所生产的产品供给人类,成为人类必须的布帛菽粟等物质。自然资源的几个方面,同时也是生物的环境形成之基础。

(1)水资源与生态控制

水是人类社会赖以生存和发展不可替代的自然资源;水资源具有循环性或称可再生性;水资源是一种区域性很强的资源;水资源具有很强的时间性;水资源具有社会性和经济性;水资源可以重复利用。以上对水资源特征的认识体现了生态动力源涵义中的资源方面。与此同时,它又是对生物起到流体动力的作用和环境保障作用的,而这些作用,也是水文生态动力源的涵义的重要构成部分。水文生态动力的控制包括作为非生物控制,也包括作为生物的生态动力汇的控制。前者宜放在首位。如果水文生态动力源不足,生物生存就难于维持,而在生态动力源可保障供给前提下,生物的生存就是对水文条件充分利用的问题了。从可行性来说,人类活动对水的控制,有一定可行性,随技术发展可行性加大。而水文生态动力源的控制必须以水资源为基础。由此可见,水文学是生态控制的一种重要基础。

(2)气候资源与生态控制

把气候看作一种自然资源是 20 世纪 70 年代中后期的事。但气候资源概念一经提出,就得到科技界和社会公众的赞同。因为气候与生物条件息息相关,气候类的生态动力因子是早已为人们重视的。到达地球表面的太阳辐射是一级生态动力源,是各种生物尤其是植物赖以生存的直接动力,为生物提供光和热。人类经过一定的手段,如冬季用温室,将太阳辐射能转化为生物生长发育所需的热量和光,为对这一生态动力过程进行表达,1999 年有人提出霜期农业气候资源概念和三指标表示法(见《霜期农业气候学》,1999),为充分利用农业气候资源提供了科学依据。在无霜期暨一般所说的大田作物生育期的农业气候资源利用的分析和区划,早已引起重视,前苏联早在 50~60 年前就很好地开展了这一类工作,并且形成了农业气候学理论,我国开展这方面的试点工作大约在 20 世纪 60 年代初,实施从中央直到县级的全国性的全面的分析和区划是在 20 世纪 80 年代。这项成果实质上是从气候资源角度出发的生态动力源汇关系的研究,是实施气候生态控制的基础。除农业之外,在林业、牧业、风能利用等涉及生物的应用气候研究,也属于气候生态控制的基础性工作,但真正要达到优化控制之目的,尚须本书后面章节所述的现代控制理论的应用。

(3)土壤资源与生态控制

从生态动力源的分类可知,土壤是一种有相对独立意义但又与另外几种生态动力源有联系的生态动力源。土壤通常是指位于陆地表面和浅水域底部、由有机物质和无机物质构成的、具有一定肥力而能够生长植物的疏松层,其厚度从数厘米到数米不等。土壤在地球表面所构成的连续覆盖层称为土壤圈,它处于大气圈、水圈、岩石圈的交换地带,是生物有机体和非生物的生态动力源之间的相互作用面。土壤的本质和生命力之所在是土壤肥力(soil fertility),它是土壤在外界的生态动力源的影响下,协调植物生理生态要求的能力,衡量这种能力强弱的标准是土壤中水、热、气、肥周期性动态,稳、匀、足、适地满足植物需求的程度。由于土壤具有上述的性质,它作为植物赖以生存的基本条件和资源这一事实,是显而易见的。事实上,除在无土栽培条件下生长的植物(在现阶段,这样的植物在地球上毕竟是极少数)之外,绝大多数植物的生长发育是离不开土壤的。

土壤资源的生态控制或许是生态控制的最早、最成熟的控制,不同尺度的土壤改良、施肥等是人们最为熟知的。但真正的优化控制还是在近年即在控制论、运筹学等用于土壤改良作业之时,而其基本依据则是土壤形成因子(factors of soil formation)函数 S 的表达式

$$S = f(cl, o, r, p, t, m)$$

式中, cl 表示气候, o 表示生物, r 表示地貌, p 表示岩石, t 表示时间, m 表示人类活动。当然这 6 个因子是有联系的,可视为状态因子,用开放系统的观点,表示为:

$$S = f(\tau_0, P_x, t, m)$$

式中, τ_0 是指第一组状态因子,即土壤系统的初始状态,即当土壤开始(假定时间为零)时土壤特征的综合情况,包括母质、地貌、矿物质和某些有机物质等; P_x 是第二组状态因子,即土壤系统状态不断变化的外部潜势,它控制着土壤系统能量与物质的供给、损失,含气候和生物方面的; t 是第三组即时间状态因子; m 是第四组即人类活动状态因子。土壤生态动力资源方面的现代优化的生态控制,本质上是利用现代控制理论及其他系统方法,优化控制式中的各种状态因子,使其朝着有利于资源利用,有利于提高植物生态产量和生态环境保护的方向发展。

(4) 海洋资源与生态控制

海洋是许多种有益于人类的生物赖以生存的水资源环境,有许多生物可同时在其中生存。它是地球上由人类开发利用的最后领域。

为开发海洋生物资源,须研究海洋生物的生命体系,以利于物质生产和系统开发,以海洋资源为人类提供新的产业基础。在海洋资源开发中,要大量开发繁殖和育种技术,发展捕渔业等。为此,须充分研究海洋生态系统及其控制规律。这就涉及无生命的生态动力源,要研究大洋环流规律,即海洋中具有相对稳定的流速和流向的大规模海水运动现象。与大气环流相似,大洋环流本质上也是由太阳辐射能所驱动的,所以总体上,属于二级生态动力源。海水和大气同属流体,它们的运动有许多相似之处,并且是相互联系着的。在大尺度海—气相互作用中,海洋对大气的作用主要是热力的,而大气对海洋的作用主要是动力的。人们通过观测和研究发现,某些海区的热状况变化可以对大气环流和气候产生显著的影响。例如,赤道东太平洋海域和赤道西太平洋“暖池”海区就是这样。在上述海域(区)每隔几年便会发生的 El Niño 事件和 La Nina 事件以及与之密切相关的南方涛动(southern oscillation)是大尺度海—气相互作用的突出表现。海洋中发生的事件对大气运动的影响规律乃至对天气变化的影响,早已引起人们的广泛重视,并为之付出极大的努力。而关于海洋对生物的影响的认识,并不限于对海洋生物的影响,而逐渐发展到海洋—大气—生物关系的研究,尤其注意到海洋大气相互作用而构成的海—气生态动力源对生存于陆地的植物类生态动力汇和动物类生态动力汇的影响。如关于海洋表面温度(海温)对陆地上农作物生态产量的一部分的影响的研究以及海温对于陆地上昆虫的影响的研究,都是生态控制的地球科学基础。尽管在宏观优化控制的策略上,一般无法直接控制海洋这样浩瀚的生态动力源,但可依其对生物的影响,科学地调节生态动力汇。

2. 生态—自然灾害的控制

任何一种自然灾害,之所以引起人们的重视,都是因为其有害于人的生命财产,其中主要是生物。所以,为了控制灾害,人们不断地探索并揭示其规律,而相当多的灾害规律是用

地球科学中的一些学科说明的。其中,相当多的灾害,需要综合研究一些边缘学科的关系,才能揭示其本质特征。下面,举出一些以地学分支为基础的灾害综合控制的问题。

(1) 洪灾与生态控制

洪灾发生的根源主要在于气象与水文类生态动力源的结合,即天降暴雨和下垫面综合作用形成的。在我国,绝大多数的河流的洪水,是由暴雨引起的。导致暴雨的天气系统有两种:一种是西风带天气系统,包括锋面、气旋、切变线、低涡、槽以及其他低压系统。我国天气预报人员所说的华北低压、河套倒槽、东北冷涡等都属于这些系统。所产生的暴雨,一般持续时间长、覆盖面广、降水总量大,在大流域内往往形成组合型的暴雨洪水。二是热带天气系统主要是热带气旋含台风造成的暴雨洪水,主要见于东南沿海和华南,北上台风时而北上至山东沿海乃至东北南部,此类暴雨造成洪水往往峰高量大。此外,对流作用形成局地性雷暴雨,可在小流域上形成来势猛、涨落快、峰高量小的洪水。

融冰融雪洪水是由冰融水和积雪融水为主要补给源的洪水,主要分布在我国东北和西北高纬度地区。冰凌洪水是由大量冰棱阻塞,形成冰雪或冰坝,使上游水位显著壅高,当冰雪融化,冰坝突然破坏时,河槽蓄水下泄而形成洪水。

洪水对生物的危害,主要表现在对农业的危害。洪水常常造成大面积农田被淹、农作物被毁,从而造成作物减产甚至绝收。

防御洪灾除工程措施外,还有非工程措施,诸如提高暴雨落区与过程预报准确率,加强防汛信息系统,提高洪水预报准确率,还有防洪保险等。要卓有成效地防治洪水就要工程与非工程措施相结合,根据流域暴雨、下垫面特征要设计出生态—工程防洪减灾体系,该体系包括生态水文分区、各分区生态建设、各分区工程建设和生态—工程防洪减灾体系管理。生态水文分区是根据下垫面地形、土壤及植被等特征,将流域分为调蓄区、行洪区、蓄滞洪区和排蓄区。各分区生态建设,与工程措施相结合,提出土地利用合理布局,保护并建设森林植被,提高流域蓄水和调节径流、行洪、蓄洪和排洪能力。各分区工程建设包括水库、堤坝、分洪、蓄洪、泄洪工程,还有水土保持建设等。生态—工程防洪减灾体系管理应该由水利学家、水文学家、气象学家、生态学家、水利经济学家组成的管理委员会按章管理。

洪水控制要依据生态—工程防洪减灾体系进行,制作洪水预报时除考虑降水、下垫面土壤、防洪工程,还要考虑森林植被作用,尤其是森林流域,要提高洪水预报准确率。

(2) 旱灾与生态控制

干旱是比洪水更具综合性特征的灾害。干旱灾害形成的自然因素主要是区域气象、水文水资源情势。所以,对于干旱灾害的研究,以气象、水文专业人员为主。因为干旱天气、水文作为生态动力源,只有对生物造成损失,才可称为干旱。受旱灾最重的生物是农作物。

牧区的干旱灾害,也是经常发生的。干旱对牧区的危害,一是以牧草为受灾的生态动力汇,那就是干旱(主要属于气象、水文类生态动力源所致的生态负效应)将降低作为生态动力汇的牧草产量和质量;二是以动物为生态动力汇的,即干旱造成牧畜饮水困难。上述两种情况都会严重影响牧畜的正常生长发育。

干旱灾害对人类赖以生存的生态系统和生态环境的影响,往往是多方面、潜在的,以及难以逆转的。干旱会造成区域水资源供水紧张,使地表径流减少,湖泊萎缩,地下水位下降,使河流、湖泊等陆地水体的纳污与降解能力下降,使地表水体污染严重。还可使土

地沙漠化面积扩大。

减轻干旱的措施主要是开源和节流,开源即开发水资源,比如调水,可以流域内调水,也可以跨流域调水,采用什么方式要视调水区和受水区实际状况酌定。节流主要指充分并合理利用水资源,比如营造防护林网、降低风速、减少农作物和地面蒸发耗水,合理的田间作业,改善土壤状况也可减轻蒸发,还有在坡耕地修建梯田,充分利用降水资源,减少水土流失,再有雨水资源利用,尤其是在半干旱、干旱地区雨水资源的储存、利用,近年来倍受关注。农业干旱防御措施有耕作、生态灌溉和工程等,在何种状况下采用什么技术是一个节水、供水优化的数学问题,可以通过生态控制模型建立与求解,提出最优方案。

3. 地貌类灾害及生态控制

地貌类灾害也是由水文、气象、地貌、生物相互作用的综合而导致的一类自然灾害,这类灾害往往是由重力生态动力源作用于生物而产生的。这里所说的重力包括水的重力作用和土体岩石的重力作用。

片流和暴流侵蚀造成水土流失,这是地貌塑造过程中产生的破坏现象,属一种灾害。水土流失灾害破坏土壤生态动力资源,被侵蚀的土地,首先受到冲刷的是最肥沃的表土层,残留下来的是大片沙砾,使土壤营养生态动力源遭破坏,比如在北方黄土区,以每年流失表土 1 cm 计算,每亩(1 亩 = 0.0667 hm²)损失养分(K,P,N)在 180 kg 以上。水土流失同时可将大量泥沙冲入农田,破坏耕层,酸性大的黄泥水对作物生长影响很大。由于淤塞河道、水库,加剧洪涝灾害,使生物环境恶化。

地貌灾害中的崩塌、滑坡、泥石流、岩溶、地面塌陷等都是重力作用对生物造成直接危害的灾害。

地貌灾害对生物的危害及其防御涉及到气象、水文、地貌、生物、工程技术多方面的综合。

二、控制的途径

地学方面的资源和灾害,无论以哪类生态动力源为主,其控制途径都有共同之处。这与这方面的因子基础的综合性有关。以地学为基础的生态环境的最优控制,原则上分为两类,一类是资源的优化利用,二是灾害的防御,即趋利避害,最大限度地使生态资源发挥增优的作用,最大限度地减灾。而两者又是联系在一起的。主要措施有以下几个方面:

1. 生物措施

(1)植树造林

造林不仅要以提高森林的覆盖率为初始目标,而且要建立森林群落的合理结构,且布局要合理,例如改变单一的针叶林(松、杉)结构,形成多层次的混交林结构,以加大森林郁闭度,最大限度地发挥森林生态功能。

(2)育草种草

草被起着快速的地面层次的保护作用,树木起着上层和长期的保护作用,在许多改善地表状况(如为水土保持)的方面,两者均不可替代,而相辅相成。

2. 工程措施

工程措施具有改变地学方面生态动力源的直接效益,是加强生态建设的百年大计。洼地容易产生霜冻,人为填平之,则可减轻霜害,提高生物产量和品质。

又如,在水土保持方面,实行沟头防护、沟床拦蓄工程、削坡升级工程,改变不合理耕

作措施(如严禁陡坡开荒,对坡地耕垦要控制在 25° 以下)等,都是以地学机理为依据的工程措施。

为进行优化控制,须充分利用地学方面已有的研究成果,进行控制原理方面的优化分析与综合。比如,上述两项措施,什么条件下,具体采用什么样的措施最为合理?若没有生态控制原理作指导,往往是主观定性。比如,植树、种草,在某个具体区域,其面积比例多大、怎样布局为宜?林、草何时更新?为改善土地利用,应加大生物措施。这些问题,均需在地学基础上作优化处理,而处理的科学方法则是生态控制原理。读者可详见第四章的一些方法和实例。

三、方法借鉴

从科学研究的方法借鉴和移植上,对基础学科的应用是相互借鉴的。比如说,对基础数学的应用,在许多方面,是地学走在生态学前面,所以生态学可借助地学的经验教训,使学科由定性走向定量,逐渐完善。

在气象学界,一提起数值预报,许多人都想到天气数值预报方法。用数学物理计算方法来研究自然现象,是在300多年前就由牛顿提出来的。其实质是将自然现象所服从的客观规律表述为力学、物理、化学或生物学的定律,这些定律又用数学语言写成数学方程,这样便把自然现象的研究归结为数学问题,用数学计算的方法来求解这些问题。其中表述为力学、物理定律者相当于人们所说的数学物理方法。在天文学史上,牛顿的同时代人埃德蒙·哈雷用这种方法经由计算在1705年预告:在1758年将有一颗大彗星再次出现,虽然哈雷(故于1742年)未能通过亲自观测验证他的计算和预告结果,但在1758年的圣诞节,业余天文学家、农夫约翰·巴里茨克观测到哈雷所预告的彗星,证实了哈雷预告的正确性,以后的几个世纪的观测(如1986年)也证实他所作的预告规律的正确性。海王星的发现(1846年,约翰·盖尔)是数学物理方法成功应用的又一成就。借鉴天文学的应用途径,气象学家早就想到用数学物理方法作天气预报。最早作尝试的是英国数学家Richardson,他于1922年发表了《用数学计算的方法作天气预报》一书,面对描写天气运动的复杂的微分方程组,Richardson提出用差分求解的办法,但由于当时的方程不能客观反映大气运动规律,计算设备远不能满足需要,所以不能应用。在经过数学方法改进,加上有了计算机,1950年实现了这种预报,开始主要是短期的,到1979年成功用于中期。

气象学上的数值预报可否用于生态学预报呢?在2001年出版的《生态动力学》一书中已提出可用的想法和实例。这就是说,生态学可以借鉴天文学、气象学的方法研究数值预报,但要注意主要借鉴气象学、海洋学、地震学的地球科学方面的方法来作生态动力的数值预报时,数学方程不仅有明确的物理概念,而且必须表达生物学意义,至于生态控制原理的许多具体的组成部分,借鉴于地球科学方法也是一种发展的捷径。生态工作者何乐而不为之呢!这里只说明借鉴之一例,本书中的许多其他方法,也是借鉴了地学方法的。当然借鉴不能是生搬硬套,必须针对问题作具体分析。

四、资料的共享

在地球科学发展过程中,在它的若干分支学科付诸实际应用和实现业务化的进程中,尤其是近百年来,积累了相当多的数据、图形资料,由于它们涉及水文、气象、土壤、地貌等作为非生物的生态动力源,所以这些历史的数据资料,对于生态控制是十分有用的,

而生物方面的尤其是生态方面的资料,如植物、动物方面的资料更不可缺少。第二类可以共享的资料是属于历史时期以前的,如古人类、古生物、历史地理方面的资料,这些对于研究地学、生态学都是有价值的。第三类资料,即作为信息的各种即时资料,可以来自卫星遥感、网上,也可以是现代其他通讯设备传递的。我们将在本书第三章作为生态控制信息资料基础加以具体说明。

第五节 生态控制的生物学基础

生态控制本身属于生物学中的生态学领域的内容。由于生态环境亦含生物的生物学习环境,即存在生物性质的生态动力源,所以生态控制含生态学与生物学中非生态科学的关系。在生态控制方面,必然涉及遗传学、生理学以及微生物学、分子生物学、植物学、动物学、人体科学等非生态方面的知识。这样,生物学中的许多学科也就构成了生态控制的基础的一个重要组成部分。下面就作者所接触到的几个主要问题加以论述。

一、遗传与生态控制

遗传学、生态学都是生物学的重要分支基础学科。在相当长时间内,这两门学科,似乎曾被一些研究者认为是风马牛不相及的。由于各学科各自强调自身优势,而否定对方的成就,两类研究者曾产生过对立,闹过相当长时间的矛盾。两者果真对立吗?并不是这样,其实作为人类活动的人工生态动力源,只有在从理论认识到实际操作,很好掌握基因与环境及其互作的关系,才能使生物的优良基因在适宜的生态环境条件下,并通过二者的相互作用,充分发挥优势,才能有利于生物的生长、发育、产量形成,从而促进人类生存环境增优,促进农林牧渔业生产的高产、优质、高效。

1. 生态育种和引种

生态育种是近年发展起来的一门新兴的学科。为了育出对生态逆境具有优良抗性的品种,从杂交方面,使父、母本有优良的组合,这须在不同的环境下作必要的处理。生态工作者为配合育种,早年作的花期相遇的计算,亲本适宜播期的预测和实施,均要以亲本组合的遗传基因为基础。在引种工作中,把适当的品种栽培在适当的环境下,是以基因为基础的机理性生态控制。如某高秆作物抗风性差,易倒伏,这是其基因决定的,引种者(非种子发明者)一般不能改变基因,也不可能左右大范围的风力、风向,但可以把适当的品种安排到合适位置,以增强生态动力源-汇的适应性。其他如针对温度、光照、土壤肥力、地貌特征、对病虫害的抗性等,也是采用与抗风类似的方法进行的。事实上,已取得了许多好的结果。

2. 基因型与生态环境互相作用

基因型与生态环境互相作用(简称 GE 互作)是在利用、推广农林牧作物品种时,使基因型在不同环境条件下得以稳定表达的基础,也是充分发挥种子生态动力源优势的一种技术。Kang 等(1989)以大豆为供试材料,在美国路易斯安纳州所作的试验研究表明:不同成熟期的栽培种在不同发育期受环境条件的影响是不同的,受肥力和栽培习惯的影响比受气象因子的影响大。

3. 环境重大变化对基因资源的影响

这是近些年才引起生态工作者重视的一个新的问题。主要是气候变化的影响,假定

未来气候变暖,各种基因资源将受到多大的影响,植物的种和品种应当如何适应变化了的环境。但假定毕竟是假定,所以对于分析结果不能大惊小怪,更不能对未来的气候变化悲观失望。正确的态度是要注意未来气候的可能演变,而通过减少 CO₂ 排放等,使大气相对稳定,遏制气候变暖速度。

二、微生物与生态控制

微生物作为生态动力源可以有生态动力正效应,也可以有生态动力负效应。人们进行生态控制时,须充分了解微生物作用过程与机制,方能很好地加以控制,所以说微生物学是生态控制的基础之一。

1. 土壤微生物的生态作用

土壤中的生物是多种多样的,其中土壤微生物(包括细菌、放线菌、真菌、藻类和原生动物等)是土壤中重要的分解者,在土壤的形成和发展过程中起着重要的作用。在土壤形成的初级阶段,利用光能的地衣等微生物参与了岩石的风化,使其成为具有生命的主体,而后,也是在微生物的参与下,形成腐殖质,从而使土壤性质发生变化。根据这些原理,可在土壤改良中,促进有益于作物的土壤生态环境的形成,这就要以微生物原理进行优化处理。

2. 致病微生物的生态作用

植物病害,绝大多数是致病微生物促成。这些微生物本身的活动与生物环境关系密切。比如由真菌致病的霜霉病可以危害黄瓜、白菜等多种植物。此时微生物可视为生态动力源,黄瓜、白菜等为生态动力汇。为进行优化生态控制,须用各种手段掌握二者之间的关系,而对微生物本身的深入了解,必须以其生物学特性等为基础学科之一部分。

三、动物与生态控制

动物的生态动力作用是多方面的。野生动物的哺食和消费,还有昆虫对植物的危害等等。

某些昆虫能造成人的疾病。动物对土壤生态也可起到源的作用。土壤动物是最重要的消费者和分解者。存在于土壤中的动物有上千种,其中很多是节肢动物。土壤中寄生性线虫寄生于许多植物,包括小麦、蕃茄、碗豆、胡萝卜、苜蓿、果树等植物的根部。而植物根部的寄生反应是多种多样的,可形成虫瘿,或成为结节,或成为畸形根。总之,活动于土壤中的动物对土壤有多方面的影响,此时土壤视为生态动力汇。动物有促进成土作用、改善土壤物理性能、提高土壤质量、改善土壤覆盖层等多方面的作用,为了解这些作用,作为生态动力源的土壤动物的研究是生态控制优化的基础之一。

四、植物与生态控制

植物作为源的生态动力控制是多方面的。可以作为源的森林对其他生物和生物环境的保护作用,是人们比较熟知的。森林是生物圈内最大的初级生产者,在陆地生态系统中具有强大的生态动力效应,对其他生物系统如农业生态系统也具有久远、广泛而深刻的影响。其主要生态功能是:调节径流、保持土壤;调节局地气候;防风固沙,保护农田和人居环境;净化空气,防治污染;降低噪声,美化大地等等。因为森林作为生态动力源,功能显著,所以在森林以外的其他生物的生态控制,首先是从森林控制入手。如前苏联

斯大林改造自然计划,我国的三北防护林工程等。在这些设计中,森林学是生态控制的基础之一。如朱廷曜在《农田防护林生态工程学》一书中所述。

草原、草山上的主要生物,包括天然牧草和人工牧草。牧草,特别是豆科牧草,有改良土壤生态的功能。牧草还能增加植被覆盖度,涵养水分,固定流沙。这样,从种草的角度调节生态动力源,是实施生态优化控制的一个步骤。

五、淡水生物与生态控制

浮游生物(含动物、植物)的主要生态作用是:浮游植物吸收水中矿物质,使水土保持一定的洁净程度,形成水域生态系统的初级生产力。多种鱼类同时对水体环境发生作用。各种水生生物之间以及水生生物与环境之间联接成一个合理的具有良性循环特征的生态系统。这个系统的控制含源、汇两个方面。由于水中生物作为源,为使系统优化,须充分了解源的各种动态特征,因而水生生物学及其许多分支必然也是整个系统中生物性质的基础,即生态控制的生物学基础在淡水生物方面的体现。

参 考 文 献

- 丑纪范、杜行远、郭秉荣. 1980. 数值天气预报浅谈. 北京:气象出版社.
- 王明星. 1993. 中国 CH_4 排放量的估算. 大气科学, 17: 52~64.
- 刘昌明、傅国斌. 2000. 今日水世界. 广州:暨南大学出版社. 北京:清华大学出版社.
- 朱廷曜、关德新等. 2001. 农田防护林生态工程学. 北京:中国林业出版社.
- 任 仁. 2002. 化学与环境. 北京:化学工业出版社.
- 汤奇成、熊 怡. 1998. 中国河流水文. 北京:科学出版社.
- 李怀甫. 1999. 小流域治理理论与方法. 北京:中国水利水电出版社.
- 李家春. 1991. 环境流体力学——它的意义、内容和方法. 见中国力学学会办公室编. 人、环境与力学. 北京:科学出版社.
- 陈 阜. 2000. 农业生态学教程. 北京:气象出版社.
- 陈效述. 2001. 自然地理学. 北京:北京大学出版社.
- 欧阳予等. 2002. 核能——无穷的能源. 北京:清华大学出版社. 广州:暨南大学出版社.
- 郁志勇. 2002. 大学化学基础. 北京:中国人民大学出版社.
- 郝吉明等. 2001. 酸沉降临界负荷及其应用. 北京:清华大学出版社.
- F. W. 魏切尔等. 1988. 放射生态学. 俞誉福等译. 北京:原子能出版社.
- 小野称幸等. 1988. 日本ナツニの催芽, 開花まで日数の温度の影響. 農業氣象, 44: 203~208.
- Bringezu, S. 2000. *Ressourcenntzung in Wirtschaftsraeumen*. Berlin Heideberg: Springer.
- Christoplerson, R. W. 1994. *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*. New York: Macmillan College Publishing Company.
- Chameides, W. L. and Predue, E. M. 1997. *Biogeochemical Cycles*. New York: Oxford University Press.
- Kump, L. P., Kasting, J. K. and Crane, R. G. 1999. *The Earth Syetem*. New Jersey: Prentice Hall.
- Meybeck, M. 1993. C, N, P and S in rivers: from sources to global input. In wollast. R. *et al.* eds. *Inter-action of C, N, P and S. Biogeochemical Cycles and Global Change*, 162~169.
- Мушкин, И. Г. 1982. *Моделирование Продуктивности Агро - Экосистем Отвер.* ред. Ленинград: Гидрометеоиздат.

第三章 生态控制的信息资料基础

从维纳的控制论以及其后的工程控制论、生物控制论、经济控制论和人口控制论等一系列涉及控制问题的著作中,不难总结出其中的最为重要且基本的三个概念:信息、反馈和控制。这就是控制论的三要素。信息既是三要素之一,说明在生态控制中,没有生态信息(含源、汇两方面信息),也就没有生态控制可言。可见,有必要用一定笔墨阐述生态控制的信息基础问题。

在生态控制中,除那些能在尽量短的时间内取得的各种信息(information)外,历史资料也是不可缺少的。这是因为生态控制的目标是使未来生态增优。为此,不但要有信息,即现时的情况,还要了解其过去。知道过去和现在,才有可能准确抓住其未来的规律。

数字和非数字的信息资料是一切科学的基础,也有学者说数字是科学的语言。所以,我们有充足理由认为信息资料是生态控制的基础之一。生态控制,如果离开信息资料就会成为无源之水,无本之木。没有信息资料,欲实施合理的控制,是不可能的。即使在没有控制原理,没有现代信息的时代,朴素的生态控制措施,比如花房育苗等,也是根据信息来控制的。比如太阳出来了,要揭开掩盖物,而在寒冷夜晚,就要盖上,以防失热太多。这是根据大自然信息,为作物创造合适生境的控制,试想如果控制者不掌握信息,怎能进行控制,又怎能控制得好。

在现代生态控制中,信息资料来自多方面。其中,由于涉及生态动力源的许多学科和业务工作的努力,给社会积累了供各界公用的资料,并可提供必要的即时信息。比如气象资料、水文资料、水文地质、海洋等资料,是由各自系统按规范观测并整编成册,一般都有相应软盘存储于机器中。而且还有些是经加工的图册,如水文年鉴、台风年鉴等。鉴于这些资料,生态工作者都比较熟悉,随时可去有关部门调用。故本章不专列节加以说明了。只主要论述古籍、遥感、网上等方面的信息资料源。读者在读第四章到第九章的内容时,将会发现,本节所提出的信息资料源问题,是读其后各章不可少的。

第一节 古典文献中的生态控制资料

由于生态控制在古代的生产、生活实践中,历来有之,所以与它有关的文字记载必然存在;另一方面,古代并无专门的生态学、控制原理方面的以及与它们有关的各专门学科,故不可能有一部完整的生态控制专门资料书。为此,我们必须从古典文献中查找,提炼出必要的生态控制科技资料。有人可能要问:既然科学技术发展迅速的今天,有关生态控制的资料信息如此之多,为什么还要从古董中去查寻呢,因为生态控制问题是有联系的,比如作为生态动力源的气候变迁及其对生物的影响,要寻求这方面的规律,只有一二百年的观测记录是绝对不够的,因为其变化周期长达 $10^2 \sim 10^3$ a,或更长一些,并且植被对于气候变化的反应存在时滞效应,其大小与植被特性、气候变化幅度及其他环境条件变化情况有关。

又如生物多样性的变化,自然灾害对人、畜、农作物影响等,也有类似特点。为抓住有关规律,必须研究过去,才能更好地联系现在,从中找出一定的规律性。我国是有五千年文明的古国,前人为我们留下的古书典籍极其丰富,对我们的工作非常有利。下面,简述一下可用于生态控制研究的一些主要资料。

早在夏商时代,人们在农业生产实践中就认识到植物生长必须有雨露滋润,单靠自然降水往往不能满足农作物的需求,因此要灌溉。当时已知道,种子下地后遇上干旱也需“负水浇稼”(据《齐民要术·种谷第三》引《汜胜之书》)。用今天的认识来解释,即是人工调节水文生态动力源,以满足作物这一生态动力汇的需要的生态控制措施。据《史记·周本纪》记载,后稷的曾孙公刘,夏时是周族的首领,进行灌溉。《诗经·大雅·公刘》中有“度其隰原,彻田为良”。《诗经》中“邠风”的《七月》是该书中最长的一篇,记载了物候与农时,说明在西周至春秋时,人们已能根据物候变化调节农时,适应自然,实质上是一种按自然规律进行生产的人工生态动力调节的雏形。

从古典文献可以查出:在西周时期,人们对林木在优化、改造自然生态条件方面的作用,实际上已有所认识。西周政府已设有管理林政的官员,提倡植树造林,保护树木。《周礼·地官司徒·闾师》说“不树者无椁”;《周礼·地官司徒·山虞》说“凡窃木者有刑罚”;《管子》中说“十年之计在于树木,为国者当谨山泽之守”。

西周时期已有治蝗的记载。《诗经·小雅·大田》云:“去其螟螣,及其蟊贼,无害我田穡,田祖有神,秉畀炎火。”说的是用焚烧捕瘥等法治蝗除害。

西汉时期,由于宗于农本思想等原因,农业生产相当发展。《汉书·艺文志》著录下了九种农学著作,其中《汜胜之书》是一部优秀的农学著作。其中的许多技术涉及农田生态调节,如调节稻田水温法,事实上相当于近代的农业生态调控技术。

耕作制度改进,实际上是人类活动调节农业生产制度,使之顺应自然条件的客观生态控制手段。在我国,宋代耕作制度的改进,主要表现在一年两熟制和两年三熟制的种植面积日益扩大。《宋史·食货志》说:北宋初年,官府劝谕江南、两浙、荆湖、岭南、福建各州百姓“益种诸谷,民乏粟、麦、黍、豆种者,于淮北州郡给之”;江北诸州也令“就水广种粳稻,并免其租”。这是当时政府试图改变“江北之民杂植诸谷,江南专种粳稻”旧耕作制度的一项重要措施。按今天的看法,则是一项顺天时地利,让生物适应环境的调控措施。宋代实施的效果证明,这项措施有成效。

在宋代,为适应气候、土壤而采取的引种措施,富有农田生态控制的优质内涵。据《续通鉴长编》说:大中祥符五年(公元 1012 年)命从福建越南占城稻“令择民田之高仰者蒔之”,由于占城稻是早籼稻,性耐旱,引种效果好,农民经选育,创造出适应当地气候、土壤等生态条件的良种。

在明代,灾害影响生物的记载,已有明确记录,如明成化十六年(1480 年),江苏崇明(今上海)县志有“九月飓风大作,海潮为灾”的记载。乃台风害记载。

清代的垦荒,对农业生产的发展,固有积极作用,但不注意造林营林,甚至毁林,造成的不良后果,贻害至今。《生态动力学》一书介绍分析的承德建山庄期间毁林的负生态动力效应乃明显例证。这从反面证实,生态控制失误的教训。

清代,关于台风影响有更详细的记载,如康熙十四年(1675 年)福建漳州福志和诏安县志中都有“八月十五夜飓风忽起,木尽拔,层瓦飞”的记载。这些都是与当时人们抗灾的活动有密切联系的,对于了解没有记录年代的灾情,向前延长现有观测序列,有一定参

考价值。

上述内容只是对一些古籍中有关的内容简介。除文献外,地方志书中,也有不少有关记载。今天挖掘这些资料当然旨在古为今用。

第二节 遥感影像资料的生态控制信息

一、基本原理

从遥感影像资料中提取有关地学、生物学信息,弥补地面观测和考察资料之不足,作大范围生态研究,是人们早就有的科学设想。遥感技术在生态学中的应用始于20世纪30年代。60年代开始的卫星遥感研究,发展到今天,已使生态研究大大受益。按Campell 1996年的定义“遥感是地面之上,根据地物在一定的电磁辐射波段内的反射或发射能量特征,对陆面和水面进行数字成像分析的实践活动”。继气象卫星之后,1972年第一颗地球资源卫星(Landsat 1)发射成功,成为遥感发展史上另一个重要的里程碑。继后连续发射,直到1994年Landsat 7,功能逐渐完善,其空间分辨率10~30m。NOAA气象卫星地面分辨率是1.1 km。法国SPOT系列卫星分辨率已达10m。而近年发射的小卫星KONOS分辨率达1m,适于在景观生态系统尺度上进行遥感分析。

遥感在陆地植被监测、资源管理中,在全球气候变化及非生物性质的生态动力源动态监测中,都有重要应用,所以成为生态控制中不可或缺的信息源。卫星遥感技术的优势是能不同的尺度上进行对地探测。如生态动力学所指出的生态动力源与汇分为生物的和非生物的,而当今的卫星遥感技术对其都有监测功能。利用遥感的生态学研究是多尺度结合,并以大尺度为主。20世纪80年代后期以来利用卫星遥感做了许多普查工作,这10多年所获取的信息资料,对生态控制原理的研究试用,有重要意义。其特点可概括为:大尺度遥感信息的广泛应用,促进宏观生态学发展,全球陆地生态系统(GCTE)等多项计划从中受益;遥感与其他系统的结合,提高了生态遥感的有效性和定量化水平;在宏观生态方面,实现信息共享,不但促进国际合作,还加强了遥感在区域和景观尺度上的应用。因为生态问题往往带有区域特性,如我国干旱和半干旱区的荒漠化,许多湖泊的富营养化,内陆湖泊的干涸,酸雨危害面积的扩展,沙尘暴的加剧,森林过伐和草场退化,湿地萎缩等,都能用遥感研究生态功能变化情况,这为生态控制提供了信息资料基础。我国三北防护林遥感调查即是典型范例(徐冠华等,1992)。

二、几个主要应用领域

1. 自然资源动态监测概述

据研究,目前人类活动生态动力源,尽管每个具体行动对于全球生态来说,是微不足道的,但其总体影响,似已达到行星级的程度,属于人类的纯自然的生态环境越来越少。人类影响的生态效应主要表现为生物效应、地球物理效应和生物地球化学效应,诸如乱砍滥伐森林,草原过度放牧;地表植被改变后引起地表辐射平衡变化,还有酸沉降导致的土壤酸化,引起植被、土壤退化等。不合理的土地利用方式也会造成景观破碎化和生态环境质量下降。面对这样的复杂局面,传统的生态研究方法不能适应大范围、连续变化现象——如“绿波”和“褐波”的推移、赤潮影的扩展、人为生态破坏的蔓延、资料评价和预

报等——的研究。而航天遥感的分辨率高、重复周期短的特征,最适于生态系统的资料分析和动态监测,因而成为生态控制的信息资料的一个方面的基础。主要有以下几个具体方面:

(1) 全球植被动态监测

通过卫星遥感分析,可以掌握全球植被的动态变化,对资源管理政策的有效制定,有重要意义。在大范围内,辨别植被的基本类型。同时是区分森林覆盖与非森林覆盖的可靠方法之一。由于森林在陆地生态系统中具有主体的作用,所以对它的覆盖面积的遥感探测结果,对全球及大范围生态控制有重要的信息基础作用。

土地覆盖变化对许多生态动力因子有影响。这些均能构成生态控制适用的信息源。最近,王绍强等采用遥感数据来估计黄河三角洲地区土地覆被变化及其对陆地碳循环的影响。经计算,1992年该地区碳储量 $11.43 \times 10^5 \text{ t}$,土壤碳库 $7.62 \times 10^6 \text{ t}$,1996年林地面积增加 $146.76 \times 10^2 \text{ hm}^2$,植被碳库增加 $7.43 \times 10^5 \text{ t}$ 。这表明:在4a间,该地区仍以植被的顺向演替占主导地位,生物量有所增加,是一个小碳汇。由此看来,合理地管理土地,采取生态保护措施,充分发挥人工生态动力源的正面效应,可使陆地碳储量增加。

(2) 土地利用状态的遥感调查

大范围土地利用状况的变化,是人类活动生态动力源的重要体现。连续调查,可以监测人们利用土地的合理性,并用控制论方法及时进行分析,提出合理控制的科学依据,尤其是对于破坏生态环境的人类活动须及时建议终止。

一般选择最佳时相和物候期(以秋季为宜)的陆地资源卫星的数字图像,经由计算机增强处理,对土地利用分类信息提取最佳波段组合光学合成的1:50万、1:20万和1:10万彩色影像为基本信息源。选定1:3万彩红外或全色航片为基准信息源。选择LANDSAT MSS多时相数字图像和(胶片)光学合成影像为补充信息源。超小比例尺彩红外航片和国土卫星影像可作为参考信息源。依据土地适宜性与土地生态动力效应相一致的原则,并考虑土地评价单元在遥感影像上可判读的原则,建立评价系统,即采用土地适宜量、土地质量宜林类型、限制因素类型、土地资源评价单元为评价序列的组合分类系统。

卫星遥感资料是区域对比及土地所有者经营策略和行为的优化控制的有效支持,为从宏观上加强土地管理提供依据。

(3) 林业资源遥感调查

用经过计算机—光学处理的新一代卫星影像,作为林业遥感调查的主要信息源。在建立地面解译标志的基础上,用目视解译方法在比例尺为1:10万(必要时1:20万)的卫星影像上勾绘图斑,编制草图。各地类——在林业遥感调查中,一般可划分为有林地、疏林地、灌木林地、无林地及宜林沙荒等——面积应当用精密面积测量量算。

用遥感获取的资料,在林业管理实践中,可以作为基本资料而发挥重要作用。例如,20世纪90年代用遥感资料对美国部分地区针叶林及混交林的定量分析显示,私有林砍伐率大于国有林。有了这样的信息,可以用行政手段控制砍伐率,以维持生态平衡。

(4) 草地资源遥感调查

草地资源遥感调查系应用卫星遥感技术查清天然草地资源(包括放牧场、割草场)和人工草地资源的类型、面积、生产力及分布状况。依此为生产建设工程的优化控制服务。

调查的条件是选择好适宜解译草地资源特征的最新遥感信息资源(以Landsat的TM影像为主),做好图像处理、判读、解译、制图的工作;尽可能按草地生产力波动周期

(指小周期)的规律,预先选好相应的本底图像、对比图像及有关资料,以研究草地动态。

在进行调查时,对选择的遥感资料进行计算机光学增强处理,筛选出适宜于草地资源调查的最佳时相与波段组合图像。对于典型县(旗)按 1:10 万的比例尺编绘草地类型图和草地等级图,量测草地面积,计算牧草产量、载畜量;重点县(旗)按 1:10 万比例尺编绘草地类型图(草地分类以草地生态系统所固有的特征为依据,依植被特性和生境因素为指标,并考虑遥感图像的可判读性与适用性)和草地等级图(比如,三级分类图,分为草地类、草地组和草地型;其划分依据主要是:优势种、共优势种、牧草生态种组以及生境分异方向的一致性),并测量草地面积。

利用遥感信息,可以对草地有关状况进行分析评估。如黄敬峰等利用天然草地的牧草观测资料、牧草产量资料、气象资料、NOAA/AVHRR 资料,建立了天然草地牧草产量植被指数和卫星遥感监测模型。利用遥感技术宏观性强、空间信息丰富的优势,正确监测牧草产量,这无疑是草地生态控制的重要信息基础。

2. 非生物生态动力源及灾情监测

如生态动力学原理所指出那样,生态动力源中的地貌、水文、气象、土壤类的非生物动力源对生物的作用是很重要的。其中,致灾生态动力源尤其给人以深刻的印象,因为它们对生物的危害往往很大。只靠地面和海洋站的直接观测不能把握这些生态动力源的宏观概貌,而卫星遥感补充了其不足,因为它对沙尘暴、霜冻、洪水、旱灾、地震、海啸、土壤侵蚀、赤潮、水层污染等都能进行即时监测,所以成为生态控制不可少的一种信息源。

(1) 沙尘暴监测

郑新江等利用 NOAA 卫星资料进行处理,得出 1994 年 4 月东亚部分地区的植被分布图(分辨率为 6km),并叠加年平均沙尘暴日数分布图(图 3-1)。图中黑色区域表示植被繁茂地区,格区为植被较好地区,横线区为植被较差的区域,空白区的植被反映最差。我国西南到华南地区以及印度半岛斜线区,是由于所研究的月份云覆盖多日所致。从图 3-1 可清楚地分析出,在春季,我国东部地区以及南方各地,植被状况好;而新疆大部分地区、青海省、甘肃和宁夏等省(区)大部分地区,以及内蒙古西部和蒙古国南部,植被覆盖状况最差(图中白色区域),裸露的地表易因午后的太阳直射作用而增温,大风扬起沙尘,致使那些区域成为沙尘暴多发区。年平均沙尘暴日在 10~50d,以春季为主。从图 3-1 可以分析出,沙尘暴日数在 40d 以上的有三个地区:新疆西部各县,位于塔克拉玛干大沙漠地区;甘肃民勤附近,位于巴丹吉林沙漠边缘;黄河河套以南地区,位于毛乌素沙地。不难看出,气象卫星遥感探测为我们提供的关于沙尘暴及其大范围植被关系的资料,对于了解沙尘暴及其形成背景,以便人们采取优化措施,以利在一定程度上控制沙尘暴,是有意义的。因此说,遥感为人类制服沙尘暴的理想实现,提供了其他技术无法替代的有用信息。它被作为生态控制的信息源当之无愧。

(2) 洪涝、大风监测

洪涝、干旱这些影响范围较大的自然灾害,需要多种遥感手段的结合才能较好地进行检测。例如,1998 年夏季,我国长江中下游、嫩江、松花江流域洪灾时日长,灾情特别严重,中科院遥感所和卫星地面站,每天两次接收 NOAA 气象卫星数据,进行跟踪监测并以机载雷达、雷达卫星等多种遥感手段结合,计算出洪水淹没农田面积,为抗洪救灾提供宝贵信息资料。

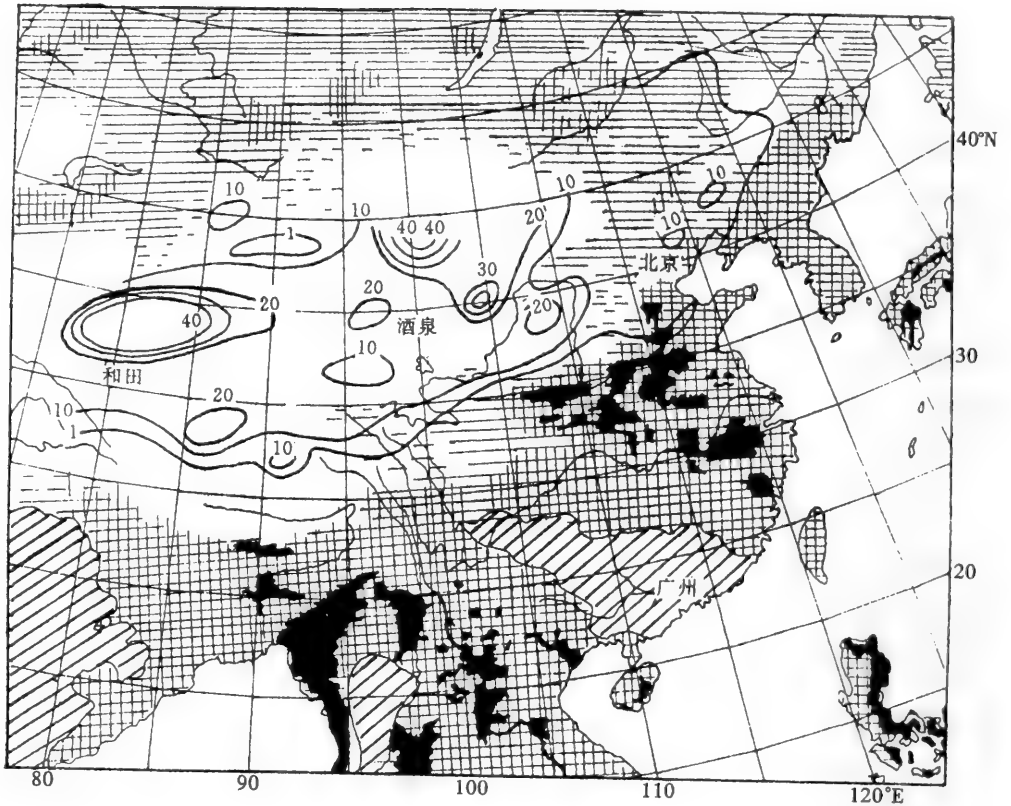


图 3-1 1994 年 4 月东亚部分地区植被与年沙尘暴日数图

关于飓风等气象类生态动力源对植被影响的研究,近年有所发展。如 Ramsey 等 (1998) 在研究有林湿地管理方面,对美国路易斯安纳州阿塔法拉亚河流域飓风过境前后地被物状况进行制图,根据植被指数 (NDVI) 的变化,估测出不同植被类型的影响程度和各种植被的抗风程度。这为有林湿地生态系统的控制决策,提供有益信息。

(3) 霜害危险带探测

霜害危险带的探测是对以往霜带小气候研究成果的发展。以往的研究主要是依据小气候观测数据,后来又增加了自动遥测气象站的数据。数据精细具体,但对较大范围霜带的宏观即时监测几乎是无能为力的。随着卫星遥感技术发展,在 20 世纪 80 年代后期,松村伸二等发表了在日本的研究成果,显示出遥感技术在霜害生态控制方面的信息基础作用,是防霜作业与管理的科学依据之一。

关于霜害危险带的探测的试验,是以国土数值信息和 NOAA/AVHRR 资料为基础的。松村等分析的区域:羊蹄山鹿、空知平原、十胜平原和名寄盆地。整个研究区域为 $60\text{km} \times 50\text{km}$, 相当于我国东部地区一个大县的面积。

为用国土数值信息探测谷地和盆地霜害危险带,用如下三种方法:①计算中心部位的环胞(单体)与其相邻的 8 个环胞之间的负高度梯度值;②计算中心环胞与它周围 16 个环胞之间的负高度梯度值;③计算进入单个环胞的谷地数。这种方法涉及到追踪从环胞到环胞的负梯度值,直到达某一低点(从该点起,显示正梯度值)。这种方法,就整个网格的每一环胞,重复进行下去。

以 NOAA/AVHRR 资料探知霜冻低温覆盖面积的方法是:①计算中心环胞与相邻 8 个环胞之间负温差值;②确定具有比临界温度低的温度的环胞。

通过上述方法计算,能比较客观地给出霜害危险带的遥感探测结果。

(4)积雪遥感信息

积雪属于水文生态动力源的一种,它有丰富陆地水资源的意义,也有危害牧区生产致灾的一面。陈乾等用 NOAA/AVHRR 的 I, II, III 三个通道的资料研究祁连山区积雪,发现祁连山区季节性积雪的补给和融化主要在春季,纠正了“河西内陆河春季径流主要看秋尽山区积雪”这一错误看法。计算表明:当年春季融雪径流量中,当年春季降雪融雪径流对上年秋冬残雪融雪径流比为 82:18。据此提出增大春雪涵蓄及合理利用雪水资源的对策。可见积雪遥感信息在生态控制中的意义。

(5)大气污染源空间分布的监测

据 Markenitz 研究,酸雨对整个土壤退化过程的影响达 38%。王彦辉(2001)介绍,德国 1993 年完成了第一次森林土壤监测,由于森林土壤理化性质变化缓慢,建议监测间隔时间定为 10~15a。通过监测主要可提供下列信息:①土壤现状与林冠状态联系的土壤性状变化;②有助于确定土壤性状改变和污染物沉降影响的原因;③估计土壤性状对森林的威胁;④估计地下水,泉水水质降低的风险;⑤有利于维持改善土壤性状和提供营养能力及树木根系吸收营养的能力。

3. 生物生态动力源与汇监测的遥感信息

在农业生态控制中,各种遥感信息的作用是多方面的。下面仅就几个主要方面加以说明。

(1)农业气象信息监测

如所周知,鉴于农业气象站网多年来在农业生态信息方面的作用,延续至今的农业气象站网仍有重要作用。前苏联和我国是站网密度大,资料积累时间长的国家;大约在 20 多年前,欧共同体有 9 个成员国 70 个农业气象站形成其站网。但这些站网,相对于农业气象条件的时空变化来说,密度不够,信息传递速度偏低。而农业气象遥感则可补充其不足。

①作物苗情

关于作物苗情,用气象卫星信息可以评定。Клещенко 曾阐述农业气象的卫星情报释读问题,所用信息取自多光谱扫描系统,具有低分辨率($<1000\text{m}$)和平均分辨率($300\sim 500\text{m}$)。结果表明:用上述信息可以判断和评定在前苏联欧洲南部地区,越冬作物发育早期(秋季和春季)苗状的可能性。在这一工作中,光谱测量的鉴定,利用了不同的标准,即记录的近红外光和红光波段光谱与其总光谱之间的反射信号的相对差异。以茎的密度状况作为苗状的指标。用于该项研究的卫星测量处理技术有:图片的选择和数据组的编制;拍摄区域的规范化处理;图片的标准;用三个苗状等级分类以确定各等级所处的地理范围。

②作物农事历

作物农事历,在以往主要用在地面的农作物物候观测的代表点资料分析确定,是一种以点代面的方法。因而不能准确地给出概况以反映大面积作物农事历实况,对于离测点远的丘陵山区,尤其如此。赖格英等(1998)在利用 NOAA/AVHRR 遥感数据提取我国南方丘陵地区水稻种植面积时,将地形、坡度、数字高度与遥感数据一起,利用模糊监督

分类方法进行处理,从而提高了分类精度。对福建福清,在一年四季都有绿色景观的前提下,利用 TM 图像,周成虎等(2001)识别出水稻等作物农事历。给出关于种植时间的主要结果:早稻为 3 月下旬到 7 月中旬。中稻为 4 月中旬至 9 月下旬;晚稻为 6 月下旬到 11 月中旬;早(甘)薯为 6 月下旬到 11 月下旬;晚薯为 7 月下旬到 12 月中旬;花生为 3 月中旬到 8 月上旬;小麦为 11 月中旬到翌年 4 月上旬;大麦为 11 月下旬到翌年 1 月上旬。

(2)作物种植面积监测资料

作物种植面积遥感监测的方法很多。最近关于这方面的新方法主要有神经网络法,即从 NOAA 图像反映水稻分布信息的绿度指标和昼夜温差值,以 Landsat TM 图像作为准真值进行分类,得出大范围双季稻面积。

(3)农作物遥感估产

农作物估产一直是遥感应应用目标之一。20 世纪 70~80 年代,美国先后发起 LACIE 计划和 AGRISTAR 计划,后者沿用至今。前者估产误差在 10% 左右。后者是前者的改进,可结合作物生长发育状况,结合实时气象资料进行估产。我国在河北的冬小麦产区进行宏观监测,估产值与实测值相关系数达 0.98。

三、有关问题讨论

我们在上面讲述遥感信息的目的,是因为这类信息和历史资料可以作为生态控制应用的基础。这些信息,从即时应用到长远生态建设,及可持续发展方面的应用,都会起到重要作用。在应用中可注意不同分辨率的差异。遥感资料的地面分辨率,目前从 1km 到 1m,使用哪一种资料应视所研究区域的大小和研究目的而定。对卫星数据进行预处理是分析结果可靠性的重要保证。使用时应注意数据上的辐射误差,地理上的定位误差等。

在进行大区域系统模拟时,遥感数据只是许多数据之一,因此协调遥感数据与源于其他生态动力源方面(如气候、土壤、地貌)数据之间的精度,是值得注意的。虽然人们可以用卫星资料来判别植被的疏密度、木材产量以及森林类型,但这样所作的分类大都是以数据统计结果为依据的,而不是以生物学机理为依据的。因此分析模拟结果往往可适用于特定的区域而不具有普适性。在生态控制中,关键是从生态属性上解释,这是今后运用这类信息的方向之一。

第三节 源于 GIS 的生态控制信息

地理信息系统(GIS)把地图信息、遥感图像信息和其他有关人口统计、土地利用、自然资源、能源、交通等信息集成起来,通过计算机统一管理,可快速检索各种形式的综合信息。在地理信息系统中,在涉及自然地理信息中,绝大多数可以构成生态动力源因子;在涉及人文地理、经济地理的信息中,有些与生态经济有关。所以说,近年发展起来的地理信息系统及其数据库是生态控制所需信息的重要来源之一。

1. 数据来源概况

地理信息系统的数据源大体可分为原始数据(第一手数据)和处理加工后的数据(第二手数据),又可将数据源分为电子数据和非电子数据两类。GIS 中的数据大多数是第二手数据。如表 3-1 所示。

表 3-1 不同数据种类及其来源

项目	第一手数据	第二手数据
非电子数据	野外测量	
	笔记	
	航片	地图
	人口普查	统计图表
电子数据	工程测量	
	全站仪、全球定位系统数据	
	地球物理、化学数据	数据库
	遥感数据	

第一手资料即定位站(如气象站、水文站、海洋站)按规范记录的资料和野外测量考察资料,用三角架、罗盘等工具,测量结果往往记录在纸上。近年,定位仪、光合作用测定分析仪等可将结果直接存储在便携计算机的硬盘里。许多新记录、传输设备的应用,可使第一手数据获取大大简化。

第一手数据资料经解译、编辑和处理后,变成第二手数据,这类数据包括地图、表格、书和杂志中的地理编码数据。对于模型简单、概念明确的空间数据,其数据标准比较容易确定,如基于定点观测的数据有土地调整数据、地球化学、水文、气象、海洋浮标观测等,对许多数据指标,都已建立了固定的数据格式。对卫星遥感影像,建立了统一的数据标准。

2. 地理图像数据库系统 System-W

石青云院士等设计的 System-W 结合图像数据库、图示语言等新兴学科分支的研究成果,着重研究了地图自动输入地理实体的综合信息查询、友好的用户界面等内容所研制的地理图像数据库系统软件。该系统与生态控制关系密切,1992 年作者曾了解系统研究过程,并考虑到生态应用问题。作为该系统长期用户的生态工作者,了解其概况,从中索取生态控制信息,是有意义的。

该系统设计时,石青云利用一种新型的线性四元树,并研究出在其上直接实现各种图像处理运算以及与其他数据结构相互转换的快速算法。

为处理好点、线、域组成的属性实体,在 System-W 中,库里的每幅地图都配有拓扑表和实体结构对照表。对于线画图,拓扑表由拓扑点表和拓扑弧构成,分别描述每个孤立点和交叉点以及每条弧。实体结构对照表描述实体标识与对应的点、弧。由于实体属性所在的关系也有一项实体标识,通过它可以把实体的几何特征与属性联系起来。

对系统的智能化和推广应用有着重要意义的另一个问题是系统配备友好的用户界面,提供一种使用方便而又功能齐全的查询语言。

该系统应用广泛,一个系统实验的例子是:从山西陆地卫星太原幅农业自然条件系列图中,集中挑选了地质图、地貌图、森林分布图、草地图、土壤图、气候图。经过合成处理为岩性图、地貌图、土壤图、植被图、气候图和政区图(称 I 级图)。由这些基础图派生了 II 级分析图——土壤侵蚀图、土地类型图。第 III 级即土地资料评价图,则利用了前两种图件和结果,对土地优劣性作出适宜性评价。最后综合成 IV 级农业自然区域图。不难看出,从这样的实验中,我们可以获得对生态控制有用的必要的宏观信息。依此,不难用各

种优化方法,解决生态控制难题。

第四节 计算机系统、数据库、网站中的生态控制信息

众所周知,生态控制所需要的信息资料,有许多来自非生态领域,是因为许多生态动力源并非来自生物,即使生物性质的生态动力源,也有相当多的内容并非生态的。但既然能够作为生态动力源要素表达的载体,许多专业性质,诸如水文、气象、海洋、农业、林业等资料信息是生态控制者不可缺少的信息源,随着生态控制研究的深入和实施范围的拓广,以数据为主的各专业信息所起的作用会越来越大。

在 20 世纪后半叶,尤其是 80 年代以后,计算机在档案系统、专业数据库和网站等领域应用技术的提高,许多信息可以及时传送到包括生态控制者在内的用户手中,而用户则利用现代化手段更为方便地搜集信息,整理信息。

迄今,我国各专业部门,都有各自的计算机系统,除为本部门服务外,还为全社会服务。下面,我们只举出气象、海洋方面近期完成的例子,读者可见这类信息源之一斑,以便在用于生态控制时,得心应手地获取。

一、档案管理系统

以省级气象档案计算机管理为例,1998 年由原辽宁省气候中心孙力威(2002)研制的“省级气象科技档案管理系统”(其结构见图 3-2)是一个完善的系统。下面简要介绍。

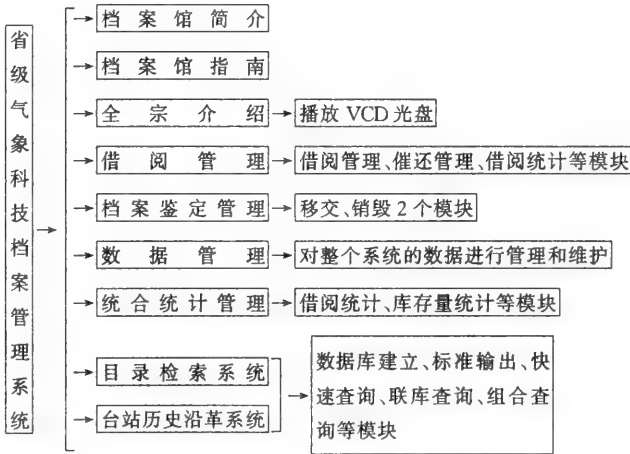


图 3-2 系统结构

1. 系统功能与模块

该系统应用 Microsoft Visual Basic 6.0 和 Access 7.0 编程环境进行程序设计,有四种主要功能,由各自模块实现。

(1) 目录检索模块

该模块收集省气象档案馆全部馆藏 1.5 万卷档案,建立了气象观测记录等 7 个子数据库。该模块主要功能是目录检索查询,并兼有数据录入、修改、删除、刷新、数据备份、数据恢复、数据压缩、打印、输出等。

(2) 台站历史沿革

台站历史沿革数据库包括地面、高空、辐射 3 个子数据库。其地面站数据结构包括站名、区站号等数十个项目;高空站数据库包括 10 多个项目;辐射站数据库也包括 10 多个项目。台站历史沿革模块具有较好的通用性,不论是哪个省分、地区的台站,只要按照要求录入资料数据便可运行。该数据库的信息量庞大,涉及的项目记录年代完整。通过本模块可快速方便地查看用户所需要的台站各个历史时期的各种历史演变情况。

(3) 借阅管理模块

该模块的主要功能是对馆藏资料的借阅、归还情况进行登记、查询和统计。并具有添加、刷新、删除、更新等功能。

(4) 数据管理模块

该模块的功能是对整个系统进行管理和维护,它可改变、完善、增加计算机对数据管理的方式和功能,包括系统注册、设置使用权限、数据文件维护、数据备份、数据恢复等模块。

2. 技术特点

该系统主要技术特点如下。

(1) 便于使用

利用先进的 Windows 窗口图形界面和全屏幕菜单驱动操作方式,结构清晰,便于使用。

(2) 模糊查询

由于生态用户很多不是气象专家,所提供信息往往带有不确切性,该系统提供的模糊查询,可解决上述问题。

(3) 多关键字检索

用户一次输入 3 个关键词,可保证查询功能的很好实现。

(4) 设置密码

对一些该保密的资料,作保密处理,必要时用户只能凭密码使用。

3. 生态控制中的应用

有了上述系统,生态控制工作人员可根据需要进行及时查询。由于气象生态动力因子占有的比重很大,所以像基础生态、景观生态、大气环保、农业、林业、水文生态等涉及生态控制的多方面项目,都可有效地利用它。这比以往手抄资料、外地查询等,要节省时间,提高效率,并使所得资料更为可靠。

二、动态气象信息网站

动态气象信息网站上,有许多生态控制工作者能及时采用的生态动力信息。现在,国内随着气象信息化快速发展,该种网站已建很多,这里介绍杨春燕(2002)设计的,利用 ASP 和数据库技术建立的一种网站。

1. 主要技术

用可实行页面自动更新的 ASP(Active Server Pages),它是建立动态、个性化 Web 应用程序的新技术,可利用服务中的功能处理用户请求,基于逻辑文件、数据库数据等提供动态的个性化内容,并处理用户的个人数据,可让多个用户同时运用 Web 服务器程序。

使用数据库 MS - Access,SQL 等保持气象数据资料,在开发中用 ASP 内的 Active X

控件 ADO(Active X Data Object)访问数据库,对数据库进行更新操作。日常的维护就是对数据库的处理,这可以通过 VB 或 VC 编程来自动实现。在开发前按照数据分类,更新时间及次数规划如数据库的结构,建好库和表。

2. 用 VB 开发数据更新程序

通过数据库、局域网,从气象通讯按常规发出的信息中截取最新天气预报和温度极值、降水量等数据。

对卫星云图文件可以通过格式转换,同时可用数据库保存云图信息。

3. 生态控制中的应用

动态气象信息,对于生态控制应用者来说,有几个方便即优点。第一,其信息功能强,使用户及时得到所需的实况数据;第二,有预报结果,可供及时参考;第三,有非数据资料,如云图实际上也是一种图像,这对于我们将在第九章讲述的生态智能控制,尤其是对模式识别来说是很有用。第四,便于与有关台站的信息交换。与 Internet(详见本章第五节)结合运用。如今 Internet 已经深入到人们生活的各个领域,人们可以及时地获取自己所需的信息,Internet 开创了一种全新的通信方式。气象领域以它行业的高科技性、服务产品的多样性、服务范围的广泛性以及对生活的重要性,使得其信息的网络化成为一种趋势。基于 Internet 的气象信息服务具有许多传统服务所不具备的优势,开拓了一种新的服务模式,可以节约投资、提高效率,又能体现气象信息业务的现代化水平。这项工作发展,对生态控制用户索取气象生态动力源要素动态极其有用。

三、海洋生态数据库系统

海洋生态数据库系统是海洋生态控制的重要信息基础。Fransz 等在总结欧洲北海生态建模研究时曾指出,所有的生态模型都需要一个强大的数据库。生态控制方面的各种模型,当然也不例外。所以,建立特定海域的生态系统的数据库系统是对海洋生态系统进行数值研究的基础。另一方面,数据库已经成为各种计算机应用系统的核心部分,其技术发展迅速。尤其是,最近世界范围的信息高速公路的兴建,又一次推动了数据库建设事业。

1. 基本概念

把某一海域的物理、化学、生物、气象、地质甚至近海的陆源等数据资料按照一定的数据模型来组织和存放,集合构成海洋生态数据库。任何一个新的生态控制研究项目都既要取得一批第一手的资料和数据,又要运用已积累的资料和数据。随着地球科学与生物科学中各个学科的相互渗透交叉和综合研究的广泛开拓,资料与数据的共享,越来越显示出其必要性和重要性。其次,海洋生态系统动力学不同于海洋科学中其他学科的单性,它是物理、化学、生物、水文、气象等交叉的跨学科研究领域,其建模对数据资料有更高的要求,其中,许多生态控制模型,从建模到实际应用,对数据库有更大的依赖性。

2. 系统结构

(1)系统建立

首先建立海洋生态系统的数据库模型,用户可根据此模型访问数据库中的数据。其次,有组织地将数据存放在储存设备上。第三,规定数据的访问权限。第四,建立访问的操作规则。

海洋生态数据库是统一集中海洋生态系统的数据库管理机构,能反映生态系统中各种

复杂的数据关系,并实现由实际对象到信息的抽象。

(2)系统结构

数据模型在逻辑上分为外部、概念和内部三级,系统结构如图 3-3 所示。由于数据库用于多种目的,才有其外部模型,所以这一部分是生态控制用户最感兴趣的。

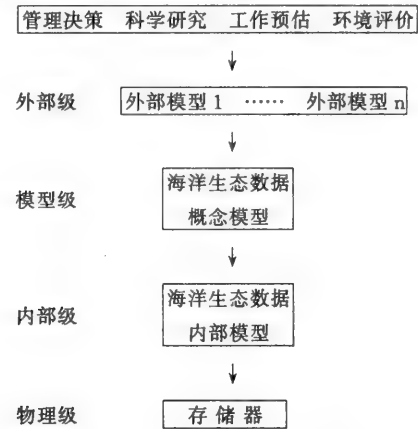


图 3-3 海洋生态数据库的系统结构

3. 主要特点

(1)结构化程度高

该种数据库系统是按照一定的数据模型来组织数据并存放,它不仅考虑数据项之间的联系,而且考虑数据记录型之间的联系。这种结构能反映数据之间的自然联系。

(2)数据共享程度高

数据库中的数据从海洋生态系统出发,考虑其信息需求,统一进行数据的组织、定义和存储。所以,数据库的数据可供研究各海域生态控制问题使用,达到资源共享。

(3)数据的独立性强

数据库系统的数据结构的定义和组织,系独立进行,与应用程序的编写没有必然联系。应用程序的修改并不影响数据结构,而数据结构的改变也不一定必须改动应用程序。于是,极大地方便了编程与数据管理。

4. 海洋数据库在生态控制中的作用

与陆地生态系统不同的是,海洋广阔,海洋中生态动力过程原本是十分复杂的,但在海洋上生活的人极为稀少,所以许多生态问题,只有通过定位测站和临时测站(含船舶站)的测定,才能取得其部分生态信息。可以说,海洋生态控制对数据的需求,似比陆地更为迫切。因此,现在建立的海洋信息系统等对理论分析模型检验、数值模拟以及决策方案的制定,有重要意义。海洋生态控制是充分利用信息,对数据进行深加工,从而寻求最优方案的过程。我国海洋工作者积累的许多数据,是海洋生态控制的宝贵信息资源。但是由于以往生态控制的概念与方法,并未深入到海洋工作者心中,社会公众甚至不太了解。这些资料必然有相当多的内容束之高阁。今天,有了数据库必将促进未来的海洋生态控制研究取得长足的进展。

第五节 生态控制的最新信息源

近年,“上网”已成为公众熟知的事。所谓上网,就是指访问 Internet 网络。目前,In-

ternet 的内容,极其丰富,可以说是包罗万象,其中有许多信息,可直接或间接地用于生态控制之中,所以我们说 Internet 网络系统是生态控制的一种新的信息源。

一、Internet 概要及其与复杂生态巨系统关系

Internet 的出现,是 20 世纪信息技术发展的必然结果。Internet 是一个特殊的复杂系统,从它的产生和发展过程来看,Internet 网络本质上并不是一个具体网络的名称,普通用户一般认为它是由数千万台计算机和上亿的用户组成的世界范围的信息资源的大型集合体。在 Internet 上,人不仅是信息的享用者,也是信息的提供者,体现了该网络是人机结合的产物这一本质特征。随着人们对生命环境的重视,社会公众生态意识增强,在网上交流的生态信息,与日俱增;加之专门的生态研究成果不断涌现,由生态专业人员提供给 Internet 的信息很多、很快,并且有一定学术价值。如裴铁璠等著《生态动力学》刚出版不久,即由作者所在单位网站提供给 Internet,以期用户及时了解。

目前,Internet 几乎链接了所有的国家和地区,整个 Internet 系统就是一个开放的复杂巨系统。在本书第十一章,读者将会看到,生态控制系统也是一个复杂的巨系统。那么,这样两个复杂巨系统又有什么关系呢?对此,至今似未见有太多的讨论。其实,我们所面对的生态控制之复杂巨系统问题的处理,是离不开 Internet 这个复杂巨系统的。试想,如果只靠我们在本章前几节所论述的生态控制信息基础,而不依赖于 Internet,生态控制所需信息,有相当多部分是不能及时传播的。而又不可能像水文气象服务那样,专门设计一套信息系统,以致生态控制业务化,难以实现。而因为 Internet 至今已几乎综合了人类有史以来各个方面的科学理论、数据和知识,融入了人类的经验、智慧和劳动成果。Internet 的形成方法就是根据人们的需求,大胆设想,定性汇总,建立模型,实验检验,发现问题修正与补充等。这个动态发展过程,正是一个从经验、半经验半理论逐渐过渡到定量结果的认识和技术更新过程,在这个过程中,人们总是自觉或不自觉地采用了从定性到定量的综合集成方法(metasynthesis method)。而利用网络的生态控制信息研究,一般也是这样进行,所以生态控制在网上的综合集成乃是整个 Internet 的一部分。在这部分中,由专业生态工作者完成的,往往是尽量以定量和理论形式提供给用户的。综合集成方法是 1990 年由钱学森院士以及于景元研究员、戴汝为院士总结并提出的处理开放的复杂巨系统的方法论。至 1992 年,钱学森院士又进一步提出“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”(Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering)。其构思是采取人机结合,以人为为主的技术路线,致力于把今天世界上千百万人的聪明才智综合起来;把人的思维、实践经验乃至科学知识,还有各种情报及有关信息集成起来,从而解决复杂问题,实现信息时代“集智慧之大成”。

二、生态系统 CO₂ 净通量: Ameri Flux 网等简介

只有对地球碳循环信息有比较充分的了解,才能较好地预测大气中 CO₂ 浓度。森林是陆地生态系统的主体,它对燃烧释放于大气中的 CO₂ 有较强的吸收作用,森林的兴衰对于调控大气中 CO₂ 浓度具有举足轻重的作用。

据目前所知,大气中 CO₂ 的累积速率有年际和十年际(年代际)的时间尺度变化。为了解这种变化过程与特征,人们采用多种方法获得有关信息。据 <http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux/scif.htm> 在 2002 年初的报道, Ameri Flux 计划是一个很好的观

测网,Wofsy 和 Hollinger 在上述网址上报告了其基本原理和发展情况。AmeriFlux 系美国北部和中部地区的 CO₂ 通量测站网,通过该网络提供信息,人们对主要生物群落中 CO₂ 吸收和净沉积速率调控因子,将有进一步了解,以便依此阐明与全球碳循环有关的某些复杂问题。通过测定到达(或来自)陆地生态系统主体的 CO₂ 净通量,了解控制 CO₂ 交换的一些主要因子——土壤过程、植被结构、植物生理状况以及所处发育期。并由此了解气候变化、空气污染和 CO₂ 浓度响应的主要反馈机制。其中有些观测站点还要测量示踪气体浓度,以便鉴别矿质燃料和生物各自的作用,进而阐明生态系统对污染和人类施氮的响应。

1. 来源

Ameri Flux 的概念起源于 1995 年 3 月在意大利 La Thuile 举行的 IGBP 国际会议,会议提出“陆地生态系统和大气间 CO₂ 及水汽通量的长期观测”。来自意大利长期网络观测资料,可用于:①对由日射、温度和植被结构年际变化引起的 CO₂ 通量的季变化,进行定量处理;②了解支配植被 CO₂ 交换的生物过程及气候过程;③检验碳平衡模式,从而提高模式对季动态的模拟能力;④对 CO₂ 交换率的时空差异作定量处理。

用三维超声风温仪、红外气体分析仪对森林冠层内及其上方 CO₂、水汽通量进行观测。

2. 通量网几个主要科学问题

通量网所提供的信息,加深了人们对几个问题的认识。

(1)碳损失问题

人类活动释放的 CO₂ 量仅有 40%~60% 存留在大气中,释放的 CO₂,有一部分被封闭在陆地生态系统的土壤和植被生物群落中,只有很少一部分被海洋吸收。

(2)年际变化问题

关于碳循环年际变化的观测资料,是了解“碳损失”汇的一个重要线索。用涡动相关法所进行的 CO₂ 净交换和“NEP 长期测量”的结果显示:在中纬度,落叶森林对 CO₂ 的净吸收,也存在着年际变化。中纬度落叶森林对 CO₂ 年吸收速率在增加,这是人们原来未预料到的。另有迹象表明,森林的响应与生长期长短有关。在北方常绿阔叶林中,温度变化有正效应,人们认为这主要是土壤和泥炭分解所造成的影响。

(3)大陆尺度、全球尺度大气肥沃化和空气污染问题

大气中有一定量的氮沉降,这是否在增加陆地生物圈对碳的吸收率?是否在使净生产力增加?对此人们还存在着争论。而且,由于 CO₂ 量的增加而产生的“肥沃化效应”,也难以肯定。已经表明,臭氧对一些农作物及原始森林是有害的,但在遥远的人迹罕见的环境中,臭氧量长期而少量的增加对植被所产生的影响,人们还不清楚。

长期的生态系统级的测量,如果和适当的生理、生态研究相结合,会对碳沉降和营养物、污染物及 CO₂ 全球尺度的循环之间的重要相互影响提供关键性数据。例如,Ameri-Flux 的一些观测站在测量 CO₂ 和水汽通量的同时,还测量臭氧浓度和沉降通量。臭氧吸收对光合效率、气孔传导率或其他参量的影响可通过仔细分析生态系统中多种环境条件下获得的资料而确定,生态系统中温度、风向、臭氧、日照以及生态功能季度或更长时间变化所产生的难以说清的影响之间都可能存在着相关性,因此,像 AmeriFlux 连续观测项目那样正研制的大量数据集对这种类型的分析而言是十分必要的。

3. 资料库及网上传输

现在在研究的一个多站点资料库,其目的是提供观测网的科学价值,用于作决策,这当然是有利于宏观生态控制信息累积与加工的有效措施,深受生态工作者的欢迎。在每一区域中心,都建设一个公用数据库,以使美国的国家全球环境变化研究所(NIGEC)在观测网中更进一步地发挥作用。设在 Oak Ridge 的 CO₂ 信息分析中心(COIAC)等单位共同管理该数据库,对经过审核并存档的数据作格式化处理,并提供给应用部门。

在 Ameri Flux 的 Web 网站上,公布可使用其网上资料的单位和个人条件。通量网内、外研究人员可利用有关资料研究碳沉积和其他有关的生态因子。获取有关资料以便研制、约束和检验所设计的各种模型,是 Ameri Flux 的主要目标。这些对全球生态研究有意义的数据和成果,是生态控制所需要的,所以包括我国在内的世界上的一些国家同 Ameri Flux 建立正式的合作关系,是很必要的。

三、用 Internet 技术监测远方野生动物动态

远方动物尤其是野生动物的动态是生态控制的重要信息源,但在技术不发达的时代,单靠人的直接考察和观察,所能获取的动态,总是十分有限的。近年 Internet 技术发展迅速,使其在生态学中的应用领域日益扩充。Yasuda 等(2002)提出了用 Internet 监测远方野生动物的新系统。

1. 系统简介

最基础的因特网视频流监测系统,包括一个视频照像机装置,一个有流动软件的服务器,一个有监测软件的接收计算机以及它们之间的网络(图 3-4)。

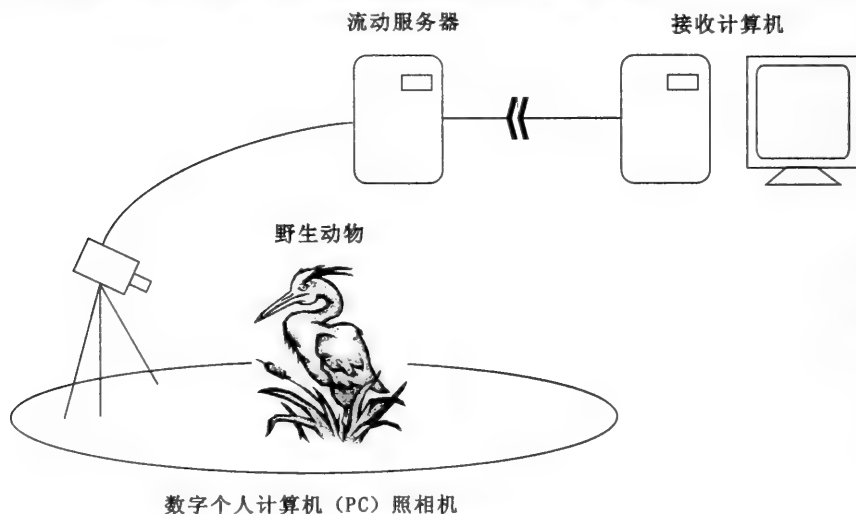


图 3-4 因特网遥测系统草图

Yasuda 等对该系统的视频源、流动服务器、接收系统、视频监测软件作了比较详细的说明。

2. 野外试验概况

在日本,野生动物遥测试验于 2001 年 1 月和 2 月在 Tama 森林科学园(35°39'N,139°17'E)进行,接收计算机设在林业与林产研究所(36°00'N,140°08'E)。PC 照相机连接流动服务器。共设 9 个监测点。

3. 效果与资料分析

该试验在 5 个夜间共拍摄:貉(*Nyctereutes procyonoides* L.)的照片 701 张;野猫(*Felis chaus* L.)的照片 845 张。通过系统验证试验得知:所取得的照片数,一般是与动物在视野中停留的时间成正比的,非参数统计检验用 Mann-Whitney,给出该结果($p = 0.00017$)($R^2 = 0.71$, $p < 0.01$)。

视频流动—监测试验的资料传输速率低,仅为 35~70 kps(kilobits per second,千比特每秒)。该系统不须用高级设备,也不要求很强的网络传输能力。这在野生动物遥测方面的应用,提供了便利条件。这样的监测试验,在森林自然保护区等环境下均可进行,达到既不破坏自然生态环境,又能获取野生动物真实动态,并及时传输有关资料,便于生态工作者监控,采取必要措施保护动物,使其生存于适宜于它们的环境之中。为进一步了解各种野生动物所在生态环境的动态,可通过试验安装必要的遥测仪器,如在野生环境中,设置微气象自动观测站,以测定那里的温度、湿度、风等要素值,设置自动水文站,以测定洪水、降水、蒸发、径流等。设置自动土壤物理、化学观测装置,以了解土壤水分等物理特性、pH 等化学状况以及土壤微生物状况。这些生态动力源信息与野生动物这一生态动力汇信息,构成源—汇平行观测系统,是优化调控生态环境,实施有利自然保护措施的信息基础。从原理上来说,是容易实现的,这对生态控制走向业务化具有重要意义。

参 考 文 献

- 王绍强等. 2001. 土地覆被变化对陆地碳循环的影响——以黄河三角洲河口为例. 遥感学报, 5:142~148.
- 王颜辉著. 2001. 酸化森林生态系统对环境变化的响应. 北京:华文出版社.
- 方宗义等. 1997. 中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社.
- 方精云等. 2002. 全球生态学. 北京:高等教育出版社.
- 孙力威等. 2002. 省级气象档案管理系统. 辽宁气象, No.1:36.
- 杨春燕. 2002. 利用 ASP 和数据库技术建立动态气象信息网站. 辽宁气象, No.1:37~39.
- 陈俊、宫鹏. 1998. 实用地理信息系统——成功地理信息的建设与管理. 北京:北京大学出版社.
- 陈乾、陈添宇. 1994. 气象卫星资料应用研究和服务进展. 甘肃气象, 12:24~26.
- 周成虎等. 2001. 遥感影像地学理解与分析. 北京:科学出版社.
- 郑新江等. 1995. 中国沙尘暴天气云图特征. 气象 No.2:46~49.
- 徐冠华. 1992. 中国三北防护林地区森林及其他再生资源遥感综合调查及监测. 中国遥感进展, 195~200. 北京:万国学术出版社.
- 黄敬峰等. 2001. 天然草地牧草产量遥感综合监测预测模型研究. 遥感学报, 5:69~74.
- 阎静等. 2001. 利用神经网络方法提取水稻种植面积——以湖北省双季早稻为例. 遥感学报, 5:227~230.
- 戴汝为等. 2002. 人工智能. 北京:化学工业出版社.
- 松村伸二、堀口鬱夫、谷宏、元木敏博. 1998. 国土数值情報と衛星データを用いた霜害危険地帯の検出について. 農業氣象, 44:101~108.
- Campell, J. B. 1996. *Introduction to Remote Sensing*. New York: Guildford Press.
- Keeling, R. F. et al. 1996. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381: 218~221.
- Ramsey, E. W. et al. 1998. Resource management of forested wetland: hurricane impact and recovery

- mapped by combining Landsat TM and NOAA/AVHRR data. *PE, RS*, **64**: 7~12.
- Schimel, R. H. *et al.* 1995. Scaling net photosynthesis at Harvard forest with remote sensing: A Comparison of estimates from a constrained quantum - use efficiency model and eddy correlation. *Plant, Cell, and Environment*, **18**: 1201~1213.
- Yasuda, M. *et al.* 2002. New method of monitoring remote wildlife *via* the Internet. *Ecological Research*, **17**: 119~124.
- Warning, R. H. and Running, S. W. 1998. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. San Diego, California: Academic Press.
- Wofsy, C. 1996. Effects of international climate variability on CO₂ exchange of a temperate deciduous forest. *Science*, **271**: 1576~1578.

第四章 现代控制理论在生态控制中的应用

本章依作者的认识,对现代控制理论在生态控制中应用的原理和主要内容加以概括论述,并结合一些关键的生态控制例子加以说明。

第一节 典型现代生态控制系统及数学模型建模原则

钱学森院士于 1954 年发表的 *Engineering Cybernetics* 一书的内容基本属于经典控制理论的范围,是继承了控制论以前伺服机构* (servo-mechanism) 的理论成果。servo-mechanism 在中文中也有译为传动系统的。当时所论的控制系统比较简单,所建立的微分方程一般是可以通过手算来求解的。1960 年前后,形成了现代控制理论。主要标志是:Kalman 提出了状态空间方法等;Понтрягин 等人提出了极大值原理和 Bellman 的动态规划。我国是应用现代控制理论较早的国家之一。早在 1962 年正当现代控制理论在国际上崭露头角的时候,我国一批杰出的学者即敏锐地感觉到它的重要性。在钱学森院士的极力倡导下,华罗庚院士热情支持,在中国科学院数学研究所,成立了由关肇直院士兼主任、宋健院士为副主任的控制理论研究室,成为全国控制理论中心,协调国内高校及其他科研单位,把研究成果用于卫星轨道和火箭制导等方面。张嗣瀛院士早在 1963 年发表了重要论文,后来被关肇直院士的专著所引用。将 Kalman, Понтрягин 和 Bellman 等人的理论方法用于生态动力学的雏形则是近年的事(《生态动力学》,科学出版社,2001)。下面让我们用生态动力学基本观点,从简单却带有普遍性意义的例子出发,引出现代生态控制原理的基本概念,继而论述其必要性和可能性。

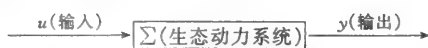


图 4-1 生态控制系统

图 4-1 是一种典型生态控制系统的示意图:用一个长方形框表示生态动力的控制系统,简称生态控制系统, Σ 是该系统的模型。长方框有一个输入,我们把它称作为生态动力输入,一般指生态动力源输入,用 u 表示。 u 经过生态动力系统加工,得到一个输出,记作 y , y 则称为观测输出。长方框里的动力是十分复杂的,一般应用者(如森林经理者、作物栽培者、牧业管理者、卫生监测者等)不能直接看到,往往是用高等数学公式表达,用计算机等设备加工处理的内容,而只能看到 y 。这就像现在大家熟悉的遥控电视设

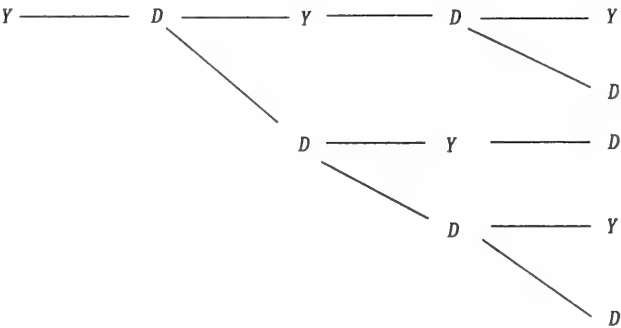
* 伺服机构又称伺服系统,是对机械运动进行自动控制的反馈控制系统,伺服系统这个名称常和反馈控制系统互换使用,但严格地说,它只是指被控量是机械位移或位移导数(如速度、加速度等)的反馈控制系统。伺服系统应达到的目的是下面的一个或几个:自动控制;自镇定;功率放大;遥控;轴同步转动。

备一样, u 就好比是遥控器, 可以根据需要按遥控器上的键, 以作频道选择等。 y 就像荧屏上的图像。 只就频道而言, 调到不同的 u , 则可以收到不同电视播映节目。 而电视机内部结构, 作为观众是无需研讨的。 比如说, 根据马尔可夫决策规划 (Markov Decision Programming) 原理调度灌溉用水, 是从水文生态动力源出发, 使农作物得到最合适的水分供应, 而又不致浪费水资源, 也不使水在汛期泛滥成灾的优化措施。 具体管水闸人员只需按规定开闸、关闸即可, 不必知道为什么要这样做。

当然, 生态控制工作者要研究系统, 他们的任务不像管水闸的工人, 也不是一个普通电视观众, 而是设计优化调度的人, 有点像我们所说的电视机的研制者。 须把图 4-1 中 Σ (生态动力系统) 刻画出来进行研究, 以满足生态控制系统优化设计的需要。 那么, 从控制系统原则出发, 应当怎样描述一个生态动力系统呢? 下面以作为生态动力汇的一对哺乳幼动物为例, 用简单的数学公式加以说明。

假设在某一自然保护区有一对幼小动物, 过了 5a 长成为一对成年动物 (下称大动物); 一对大动物, 每 5a 生一对小动物。 由一对小动物开始, 问几个 5a 以后, 在假定动物不死的前提下共有多少对动物?

如果我们用 Y 表示一对幼小动物, 用 D 表示一对大动物, 那么依据上述约定, 很容易得到自然保护区内动物增长图 (图 4-2)。




```

int F (int n){
    if (n≤2) return(1);
    return F(n-1) + F(n-2);}

```

可见,式(4-1)能够简单地生长一个数列。这是假定没有生态控制的任所论动物无限增长的情形,所以不能称之为生态控制系统。如果把动物的例子取作长白山自然保护区中的一种老虎,那么不加控制(这里所说的控制,含自然控制和人类活动的自觉不自觉地任其繁衍下去,老虎就会随着 n 的增大而变得越来越多。众所周知,这实际上是不可能的。从生态动力源系统来解释,多种生态动力源都能控制该动物的生态系统(或确切点说,在该生态系统中,生态动力源中的许多因子都对老虎这个生态动力汇起到控制作用)。比如说,保护区内的小动物可以被老虎捕获而充饥,成为老虎的营养生态动力源,随着小动物减少,老虎因食物不足而减少。还有温湿风气象生态动力源,山洪暴发可能毁坏林木等植物,冲击老虎的栖身地,成为一种水文生态动力源,泥石流、滑坡等突发性灾害可机械性地导致老虎死亡,成为重力性质的地貌生态动力源。

现在假定,自然保护区的管理者对区内的某种动物进行调节,以此人为地改变生物性质的生态动力源结构(食物链),事实上,也使原有自然保护区,实际上成为有人工干预的生态试验区。管理者每 $5a$ 根据区内该种动物的多少,引进或输出 u_n 对小动物。这样一来,式(4-1)就可以写成

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} + u_n \quad (4-2)$$

于是,在假定其他生态动力源稳定的条件下,这种动物的对数就可以由 u_n 加以人为控制了。如果我们把保护区内该种动物的实际数目看成是输出,那么应得到一个生态控制系统。因为这样,经由上述程序按生态动力规律来模造出的生态系统,恰好符合著名意大利数学家 Fibonacci 数规律,所以称为 Fibonacci 生态控制系统,其结构绘于图 4-3。

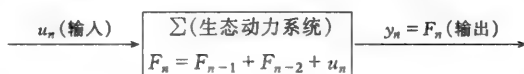


图 4-3 Fibonacci 生态控制系统

方程(4-2)是一种差分方程,其中所用的动物对数的时间间隔是 $5a$,即动物的对数每 $5a$ 才变化一次。有些生物,世代繁衍变化得很快,例如真菌、黏虫等。对于那样一些生物,为研究其生态控制系统,时间间隔应当取得非常小。当时间间隔趋于零的时候,上面所述的差分方程就成为微分方程。无论是差分方程或者是微分方程,在描述生态控制系统时,都是常用的方程。

输入-输出系统是控制理论研究的主要对象,生态控制的输入-输出系统乃是生态控制理论研究的主要对象。输入-输出关系一般叫做生态系统的动力学行为。所谓控制就是基于可获取的数据为确定可实现的给定目标所必须的输入。

根据具有生物学意义的生态动力源、汇关系,建立生态控制模型,然后依据所建模型,找出不同的控制策略(如森林砍伐与可持续发展、鱼塘捕捞优化策略、增加农作物产量的间作套作方式、免耕留茬高度、工厂化农业设施中的温度、湿度、风的自动调节策略等),以实现给定目标。这就是现代控制理论应用于生态动力系统的控制的主要方向。建立生态控制的数学模型是非常重要的。这种模型必须有清楚的生物学意义,且能反映

生态系统的客观情况,也就是最关键的模型合理性问题。例如,前面所说的保护区生态系统,如果管理者每 5a 引进或输出的是 u_n 对大动物而非幼小动物,方程应当怎样列?如果幼小动物 10a 才能长成大动物,方程形式又是怎样?直接给出这样一类的输入-输出模型是比较困难的。尤其是对生态控制系统,实际情况绝非像上例那么简单。因为保护区生态系统相当复杂,一种动物的生育和生存与其生物类生态动力因子密不可分(例如,一种动物可能被比它凶猛的动物吃掉,只靠肉食生存的动物可能因为缺少食饵而饿死,食植动物可能因植物不足而失去其营养生态动力源),也与非生物生态动力源密不可分。而如果不作为自然保护区,野生动物有可能遭到人的猎杀。对于这些情况,只用上述简单的数学公式就不行了。而将 Fibonacci 生态控制用状态方程表示出来,就显得相当容易了。

下面叙述试用该方法的原理。

第二节 生态控制系统描述与分析的状态空间方法

状态、状态变量和状态空间的概念及其某些相应的方法在解析力学、热力学、统计物理学、量子力学等反映机械运动和物理运动规律的学科中早有运用。在现代生态控制理论中,引入“状态”概念,实际上就是说,我们不再把生态系统看作一个“黑箱”,不再只考虑生态控制系统的输入和输出;而是要考虑该系统的内部状态。在经典控制理论中,研究的是简单的单变量系统,因此根据输入与输出作线性分析还是可能的。对于如同我们在前一节所述的错综复杂的生态控制系统来说,按简单的方法进行分析与综合,就显得很不合理了,而把状态变量考虑进去,所得结论才能比较客观。对此,用黑箱-灰箱-白箱理论是不难理解的。

从数学的角度来说,任何控制系统一般都是能用任意阶的微分方程加以描述的。因为生态控制系统是很复杂的,所以描述它的微分方程的阶数就应当高,而阶数过高的微分方程,为求解等带来诸多不便。对于多输入、多输出的生态控制系统来说,由于各种源-汇关系十分复杂,只有引入状态变量,才能使微分方程的阶数降低。如果运用数学技巧,结合生态控制系统中的具体动力源-汇问题,适当地选择状态变量,就能将高阶微分方程用微分方程组表示出来。阶数越高,微分方程的个数就越多,可用矢量和矩阵表示。

关于生态控制系统中的状态,是用仿物理系统中的一个重要概念加以定义的。假定我们在某时刻 t_0 启动一个生态控制系统,并在时间间隔 $[t_0, t_1]$ 内,作用于该系统的输入为 u ,那么该系统的输出,是否由输入 u 唯一确定了呢?一般说来,答案是否定的。

在现代控制理论中,系统模型建立后,须对系统的性能进行研究,这就需要进行系统分析。系统分析的方法已有很多,这里只介绍生态控制系统中常用的状态空间方法,它是一种对线性动力系统方程求解的方法,是此后将要讲述的生态控制的最优控制算法的基础。

为了求解线性定常系统,我们将生态控制系统的状态方程写成如下形式

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (4-3)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t_0) = \dot{\mathbf{x}}_0 \quad (4-4)$$

这里 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 是 $n \times 1$ 维向量, $u(t)$ 是 $r \times 1$ 维向量, \mathbf{A} , \mathbf{B} 分别是 $n \times n$ 维矩阵和 $n \times r$ 维矩阵。由微分方程的基础理论可知道,在初值被确定下来之后,式(4-4)的解就惟一

地决定下来;且方程的解由两部分组成,即由齐次方程的通解和原方程的特解组成。

为了求解,我们必须首先引进方阵的指数函数。方阵 A 的指数函数被当作一个纯量函数,用下面的幂级数定义之:

$$\exp A \triangleq I + A + A^2/2! + \cdots + A^k/k! + \cdots \quad (4-5)$$

式中, I 是 $n \times n$ 阶单位阵。可以证明该级数对于具有有限阶的任意矩阵 A 都是收敛的。我们用 At 代换式(4-5)中的 A , 可以得出下式:

$$\exp(At) = I + At + \frac{t^2}{2!} A^2 + \cdots + \frac{t^k}{k!} A^k + \cdots \quad (4-6)$$

$$t_0 \leq t \leq T_0$$

故

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\exp(At)] &= A + A^2 t + \frac{t^2}{2!} A^3 + \cdots \\ &= A \exp(At) \\ &= \exp(At) A \end{aligned} \quad (4-7)$$

由方程式(4-3)可知

$$\dot{x}(t) - A\dot{x}(t) = Bu(t) \quad (4-8)$$

如同对待纯量方程一样,对于方程(4-8)两边都乘上积分因子 $\exp(-At)$, 我们可以得出:

$$\exp(-At)\dot{x}(t) - \exp(-At)A\dot{x}(t) = \exp(-At)Bu(t)$$

此即

$$\frac{d}{dt} [\exp(-At)\dot{x}(t)] = \exp(-At)Bu(t)$$

上式两边,从 t_0 到 t 之间的积分是

$$\exp(-At)x(t) - \exp(-At_0)x_0 = \int_{t_0}^t \exp(-A\tau)Bu(\tau)d\tau$$

所以,我们有

$$x(t) = \exp A(t - t_0)x_0 + \int_{t_0}^t \exp A(t - \tau)Bu(\tau)d\tau \quad (4-9)$$

在式(4-9)中,第一项由 x_0 决定,它表示齐次方程的通解,第二项是非齐次方程的特解。

令

$$\Phi(t, t_0) = \Phi(t - t_0) = \exp A(t - t_0) \quad (4-10)$$

则齐次方程 $\dot{x}(t) = Ax(t)$ 的解可以表示为以下的等式

$$x(t) = \Phi(t - t_0)x(t_0) \quad (4-11)$$

由式(4-11),可以看出,系统在时刻 t 的状态值,是由初始状态 $x(t_0)$ 经由 $\Phi(t - t_0)$ 作用之后得到的。因此,我们可以将 $\Phi(t - t_0)$ 看成促使状态转移的矩阵,因而我们称其为状态转移矩阵或状态跃迁阵。

由式(4-6),我们容易得出

$$\Phi(0) = I \quad (4-12)$$

$x(t)$ 在两个不同时刻的解,可以表示为

$$x(t_1) = \Phi(t_1 - t_0)x(t_0) \quad (4-13)$$

$$\mathbf{x}(t_2) = \Phi(t_2 - t_0)\mathbf{x}(t_0) \quad (4-14)$$

如果取初始时刻为 t_1 , 求 $\mathbf{x}(t_2)$ 的值, 那么可以得出:

$$\mathbf{x}(t_2) = \Phi(t_2 - t_1)\mathbf{x}(t_1) = \Phi(t_2 - t_1)\Phi(t_1 - t_0)\mathbf{x}(t_0) \quad (4-15)$$

对于式(4-14)和式(4-15)加以比较, 我们可以得到

$$\Phi(t_2 - t_0) = \Phi(t_2 - t_1)\Phi(t_1 - t_0) \quad (4-16)$$

由以上各有关公式, 我们可以有充分依据地看出状态转移矩阵的“转移”作用。

我们也可以看出, 转移矩阵的如下几个特征:

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= \Phi(t_0 - t_1)\Phi(t_1 - t_0) \\ \Phi^{-1}(t_1 - t_0) &= \Phi(t_0 - t_1) \\ \Phi^{-1}(t) &= \Phi(-t) \end{aligned} \quad (4-17)$$

利用转移矩阵, 状态方程的解(4-9)可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t - t_0)\mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t - \tau)\mathbf{B}\mathbf{u}(\tau)d\tau \quad (4-18)$$

对于线性时变系统, 我们也可以得出一组类似的公式。

上述的状态方程, 我们也可以用 Laplace 变换的方法, 对其求解。

对于齐次方程

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (4-19)$$

作 Laplace 变换后, 我们可以得出

$$\mathbf{x}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{x}(0) \quad (4-20)$$

这里, $\mathbf{x}(s)$ 是 $\mathbf{x}(t)$ 的 Laplace 变换, 即

$$\mathbf{x}(s) = \mathcal{L}[\mathbf{x}(t)]$$

对于式(4-20)作 Laplace 变换后, 我们可以得出

$$\mathbf{x}(t) = \mathcal{L}^{-1}[(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{x}(0)] \quad (4-21)$$

对式(4-11)和式(4-22)加以比较, 可以得到:

$$\Phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}] \quad (4-22)$$

式(4-22)给出了寻求状态转移矩阵的另一种途径。

下面让我们分析一下离散时间状态方程的求解方法。

设生态控制系统的离散状态方程式

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \quad (4-23)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (4-24)$$

对于比零大的任意 k 值来说, 方程(4-23)的解可以用迭代法直接求出:

$$\mathbf{x}(1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(0) + \mathbf{H}\mathbf{u}(0)$$

$$\mathbf{x}(2) = \mathbf{G}\mathbf{x}(1) + \mathbf{H}\mathbf{u}(1) = \mathbf{G}^2\mathbf{x}(0) + \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{u}(0) + \mathbf{H}\mathbf{u}(1)$$

$$\mathbf{x}(3) = \mathbf{G}\mathbf{x}(2) + \mathbf{H}\mathbf{u}(2) = \mathbf{G}^3\mathbf{x}(0) + \mathbf{G}^2\mathbf{H}\mathbf{u}(0) + \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{u}(1) + \mathbf{H}\mathbf{u}(2)$$

其一般形式为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{G}^k\mathbf{x}(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \mathbf{G}^{k-j-1}\mathbf{H}\mathbf{u}(j) \quad (k=1, 2, \dots) \quad (4-25)$$

显然, $\mathbf{x}(k)$ 可以分为两个部分, 其一, 与初态 $\mathbf{x}(0)$ 有关; 其二, 与输入 $\mathbf{u}(j)$ 有关 ($j=1, 2, \dots, k-1$)。矩阵 \mathbf{G}^k 叫做状态转移矩阵, 记为 $\Phi(k)$ 。它是下列矩阵方程的惟一解

$$\Phi(k+1) = \mathbf{G}\Phi(k), \quad \Phi(0) = \mathbf{I} \quad (4-26)$$

由此,式(4-25)可以改写为

$$\begin{aligned}x(k) &= \Phi(k)x(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \Phi(k-j-1)Hu(j) \\&= \Phi(k)x(0) + \sum_{j=0}^{k-1} \Phi(j)Hu(k-j-1)\end{aligned}\quad (4-27)$$

输出 $y(k)$ 可以表示为:

$$y(k) = C\Phi(k)x(0) + C\sum_{j=0}^{k-1} \Phi(k-j-1)Hu(j) + Du(k) \quad (4-28)$$

以上讲述的都是针对线性生态控制系统的,是假定所论生态系统可以在简化处理后被视为线性系统,并能用线性微分表达。如所周知,在生态控制系统中,有些源-汇关系是可以近似地用线性微分方程描述的。这些系统的基本特征,即输出的响应特征、状态响应特征、状态转移特征等,都具有线性特征,满足叠加原理的基本要求。上面所说的生态控制的线性系统的基本限制,是对生态控制系统的一种理论假设,也叫线性假设。事实上,真实的生态控制系统,大都存在着非线性特征,严格意义上的线性生态控制系统是不存在的。而对于非线性微分方程,大多数用近似法或数值法近似求解。对于随机动态系统,用随机微分方程或随机差分方程加以描述,其状态为一随机过程,求解更为复杂,往往仅能求得正态过程的分布函数。但这对于某些生态控制问题,是有意义的。

第三节 最大值原理在最优生态控制中的应用

本节将研究控制策略 $u(t)$ 约束在集合 U 中时的生态最优控制问题。从现代控制理论出发,解决上述问题的主要工具,也是目前最适宜的数学方法,乃是 Понтрягин 最大值原理,该原理是由前苏联著名数学家 Понтрягин 于 1956 年研究出来的。下面,让我们先简单介绍一下该原理,再论述它在生态控制问题几个方面的应用。

一、最大值原理

假定生态控制系统的数学模型是:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (4-29)$$

其初始状态 $x(t_0) = x_0$ 已给,容许的控制策略 u 属于某个集合 U ,即

$$x \in U$$

求解生态控制决策问题,就是求 u 的问题,使目标函数

$$J(u) = \theta[x(t_f), x_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(x, u, t) dt \quad (4-30)$$

取得最小值。

如果 $f(x, u, t)$ 的每个分量和 $L(x, u, t)$ 都是连续可微的,那么最优控制决策 u^* 和它相应的状态 x^* 由以下的必要条件所决定。

1. 协态向量 $\lambda^*(t)$

协态向量 $\lambda^*(t)$ 和相应的 $x^*(t)$ 满足如下的正则方程

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \\ \frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} \end{cases} \quad (4-31)$$

2. Hamilton 函数

$$H(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, u, t) = L(\mathbf{x}^*, u, t) + \boldsymbol{\lambda}^{*T} f(\mathbf{x}^*, u, t)$$

作为 u 的函数将在 $u = \mathbf{u}^*(t)$ 取得最小值, 即

$$H(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \mathbf{u}^*, t) = \min_{u \in U} H(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, u, t) \quad (4-32)$$

3. 边界条件

如果 $\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}_f$ 是给定的, 那么正则方程的边界条件是

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad \mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}_f \quad (4-33)$$

如果 t_f 被给定, $\mathbf{x}(t_f)$ 是自由的, 那么正则方程(4-31)的边界条件是

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad \boldsymbol{\lambda}(t_f) = \frac{\partial \theta[\mathbf{x}(t_f), t_f]}{\partial \mathbf{x}(t_f)} \quad (4-34)$$

如果 t_f 也是自由的, 就必须增加一个条件, 以决定 t_f , 这里应增加的条件用公式可以表达如下:

$$H[\mathbf{x}(t_f), \boldsymbol{\lambda}(t_f), \mathbf{u}(t_f), t_f] + \frac{\partial \theta[\mathbf{x}(t_f), t_f]}{\partial t_f} = 0 \quad (4-35)$$

当所研究的问题是求解 $u(t)$, 以使目标函数取得最大值的时候, 那么必要条件式(4-30)就应当改写如下:

$H(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, u, t)$ 作为 u 的函数在 \mathbf{u}^* 取得最大值, 即

$$H(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \mathbf{u}^*, t) = \max_{u \in U} H(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, u, t) \quad (4-36)$$

以上简述了最大值原理的内容。关于原理的说明, 已有许多数学和控制理论方面的论著给出, 这不是本书论述的范围。但是, 为在许多生态控制问题中, 能比较合理地运用该原理, 理解该原理的基本思想, 则是很重要的。回顾一下我们在上节关于状态变量方程, 考虑生态工作者面临的大量生态控制问题, 如大面积砍伐森林和森林更新优化问题, 工业区 CO_2 排放与空气质量优化控制问题, 野生动物引种及家畜生境优化问题, 农林作物病虫害优化防治问题, 诸如此类问题是复杂的, 比工业技术、商场管理等要复杂得多, 因此不能像处理纯物理性质问题那么容易求解。也就是说, 在诸多生态控制问题中, 寻找关于状态变量的最优解比处理物理运动、化学运动问题难得多(即使物理运动和化学运动问题, 求解也是困难的)。因此, 需要一组新的变量, 那就是数学家所说的伴随变量。在寻求最优解的时候, 不但有原来的状态变量所满足的方程, 还有伴随变量所满足的方程, 即前面所说的协态变量。这样一来, 为了求状态变量的最优解, 方程与变量都增加了, 但求解的过程反而容易了, 这正是最大值原理绝妙高超之处。

最大值原理适用状态控制系统的另一个优点是, 它适合于控制受限制的控制系统, 而生态控制系统含若干个系统, 正是控制受限制的系統。例如, 我们用太阳能作为生态动力来控制生物生存环境。太阳能的转化自然有个范围, 不能生物需要多少, 就能转化多少, 事实上, 植物对于太阳能的利用总是很有限的。在农业生产上, 作物的生态产量也总是有限的。这样一类约束总是比较简单的, 一般可以表示成一个区间(比如生态产量在区间 $[-400\text{kg}, 400\text{kg}]$), 控制只在区间范围内变化。

总之, “少投入, 多产出”, 这也是生态最优控制的宗旨。这里所谓多产出不仅指一般的经济和生态产量问题, 也含使生态动力功能增强的问题。比如, 森林水文气象功能增

强,虽然目前还不能准确算出经济效益,但生态功能增强,生态环境进一步优化,多产出是必然的。随着生态学发展,生态功能的经济效益,会逐渐计算清楚的。

要真正实现生态最优控制,一方面要针对生态问题,积累数据,认清优化目标的实质,另一方面,生态工作者不断补充有关数学知识,其目的是应用它解决具体的生态控制问题。

二、可再生资源持续利用的优化控制

可再生资源的最优控制,在生态方面是很多的。森林是陆地生态系统的主体,要维持其生态功能,就要考虑其长远的可持续利用;草原的牧草,鱼塘、水库中的鱼,也都是可再生资源,同样都有可持续利用策略,需要我们去研究。以森林为例,采用什么方式采伐,什么时间采伐,才能既保障森林可持续利用,又能提高森林效益?下面用 Понтрягин 最大值原理说明求最优控制策略的原则和过程。而最优控制方案依据对森林生长规律及其与环境的关系。在 20 世纪中期以前,砍伐森林只考虑经济效益,忽略了生态效益,导致水土流失,生态破坏等后果。森林是生物性质生态动力源,但同时也影响着非生物性质的生态动力源,它具有涵养水源,调节径流与气候,防风固沙、净化环境的生态功能,同时还能为人类提供木材、燃料、药材、工业原料,还有动物资源。森林中某些树木种的灭绝,意味着将会有 10~30 种依附于它的原处于谐和生态共生状态的其他植物归于消亡。森林在生物圈的碳循环、氧循环和氮循环中,处于特殊的生态自动调控的地位。

但是,过度采伐或毁林,会给地球生态造成灾难性后果。据联合国 FAO 在前几年公布的资料,每年有 $1100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的热带雨林被砍掉。又据美国世界资源研究所 1990 年的报告,世界上砍伐速度很大,大约为 $38 \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。第二次世界大战后,地球森林资源减少将近一半。

森林砍伐速度,应予以限制,当然必要的更新以利可持续发展,是理所当然的。因此,必须研究砍伐的最优化原则,下面以 Понтрягин 最大值原理,作数学优化解释。

设 $x(t)$ 是在时刻 t 森林的可用材积; $u(t)$ 是在时刻 t 的砍伐速度; p 是单位体积木材的价格($\text{万元} \cdot \text{m}^{-3}$),视其为常数; c 是单位体积的砍伐费用($\text{万元} \cdot \text{m}^{-3}$),也视其为常数; $f(x)$ 是森林的增长函数; $g(t)$ 是增长系数。

森林的状态方程可以写为

$$\frac{dx}{dt} = g(t)f(x) - u(t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (4-37)$$

其目标函数(贴现总收益)可以写为

$$J = \int_{t_0}^{\infty} [\exp(-\delta t)](p - c)u dt \quad (4-38)$$

森林砍伐的最优控制问题,是在约束条件

$$x(t) \geq 0 \quad 0 \leq u \leq u_{\max}$$

之下,求出最优控制策略,使贴现总收入 J 取得最大值。

森林砍伐最优控制问题的 Hamilton 函数是

$$H = [\exp(-\delta t)](p - c)u + \lambda[g(t)f(x) - u] \quad (4-39)$$

其协态方程是

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\lambda g(t)f'(x) \quad (4-40)$$

如果我们令

$$\bar{\lambda} = \lambda \exp(\delta t)$$

即

$$\lambda = \bar{\lambda} \exp(-\delta t)$$

那么, Hamilton 函数就是

$$H = \exp(-\delta t) \{ (p - c)u + \bar{\lambda} [g(t)f(x) - u] \} \quad (4-41)$$

其协态方程为

$$\frac{d\bar{\lambda}}{dt} = \bar{\lambda} [\delta - g(t)f'(x)] \quad (4-42)$$

因为 Hamilton 函数中略去因子 $\exp(-\delta t)$ 之后, 不影响以下的运算步骤, 同时为了书写方便起见, 将 $\bar{\lambda}$ 仍写为 λ 。这样, Hamilton 函数可以改写为

$$H = (p - c)u + \lambda [g(t)f(x) - u] = (p - c - \lambda)u + \lambda g(t)f(x) \quad (4-43)$$

而相应的协态方程可以改写为

$$\frac{d\lambda}{dt} = \lambda [\delta - g(t)f'(x)] \quad (4-44)$$

由于以上的 Hamilton 函数对 u 来说是线性的, 所以最优控制应当取为

$$u^* = \begin{cases} u_{\max} & \text{当 } p - c - \lambda > 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } p - c - \lambda < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-45)$$

下面, 让我们按求解最优控制问题的变分法, 完成以下步骤。这里所说的变分法, 是数学中出现得较早的一个分支(在 Newton 以前实际上已被提出)。早期在研究所谓短程线问题时提出的, 系 1630 年由 Galileo 首先提出, 在 1696 年由 Bernoulli 解决。直到现在, 变分法已经发展得相当完善, 并用于求解最优控制中的许多具体问题, 如求动态最优控制问题的解, 求最优价格问题的解。

回过来, 继续讨论我们的森林砍伐控制问题。令控制变量 u 的线性项系数等于零, 即可得出奇异控制:

$$\lambda = p - c$$

令

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0$$

求得相应的 \bar{x} 必须满足

$$f'[\bar{x}(t)] = \delta/g(t)$$

当函数 f, g 均为已知的时候, 便可由上式解出 $\bar{x}(t)$, 并由状态方程得到

$$\bar{u}(t) = g(t)f[\bar{x}(t)] - \frac{d\bar{x}}{dt} \quad (4-46)$$

当 $f(x)$ 是 x 的正的凸函数而 $g(t)$ 是 t 的正的减函数的时候, 我们可以得到

$$\frac{d\bar{x}}{dt} \leq 0$$

因而, 我们有

$$\bar{u} \geq 0$$

在图 4-4 中, 我们给出了最优控制策略。

① 当 $x_0 < \bar{x}(t_0)$ 的时候, 应取 $u^* = 0$, 使 $x(t)$ 增加, 一直增加到 \hat{t} 的时候, 把它切换

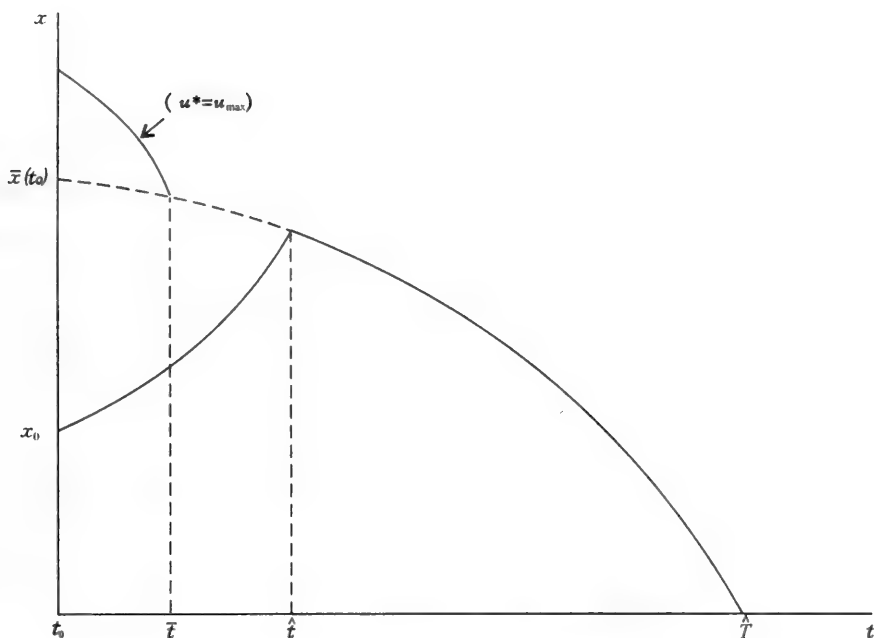


图 4-4 森林砍伐最优策略和最优轨线

为 $u^* = \bar{u}(t)$, \hat{t} 是当 $u^* = 0$ 的时候, 轨线 $x(t)$ 与 $\bar{x}(t)$ 相交的时间。

②当 $x_0 > \bar{x}(t_0)$ 的时候, 则取 $u^* = u_{\max}$, 使 $x(t)$ 减小, 一直减少到 \hat{t} 时, 把它切换为 $u^* = \bar{u}(t)$ 。 \hat{t} 是当 $u^* = u_{\max}$ 的轨线 $x(t)$ 与 $\bar{x}(t)$ 相交的时间。这样, 我们就得出如下的一组最优控制策略。

当 $x_0 < \bar{x}(t_0)$ 的时候,

$$u^* = \begin{cases} 0 & \text{当 } t_0 < t < \hat{t} \text{ 时} \\ \bar{u}(t) & \text{当 } \hat{t} \leq t < T \text{ 时} \end{cases} \quad (4-47)$$

当 $x_0 > \bar{x}(t_0)$ 的时候,

$$u^* = \begin{cases} u_{\max} & \text{当 } t_0 \leq t < \hat{t} \text{ 时} \\ \bar{u}(t) & \text{当 } \hat{t} \leq t < T \text{ 时} \end{cases} \quad (4-48)$$

当 $x_0 = \bar{x}(t_0)$ 的时候,

$$u^* = \bar{u}(t) \quad (4-49)$$

按以上策略, 当可取得最优效果。

三、防风设施的维护与更新问题

防风是防御气象类生态动力源给防御对象(作为生态动力汇)带来的灾害的一种手段。这里所说的防风对象是广泛的。它们可以是①农田, 如麦田、玉米田、棉田等旱田, 也可以是水稻田; ②苗圃, 如为培育树木种苗而建设的种苗基地; ③草场, 如生长牧草的草库仑; ④某些小动物的野外试验场; ⑤果园。由于这些地方生长着的农林牧草作物和小动物, 都须经受露天的生态环境, 但都怕大风, 尤其是 7 级以上的大风, 有可能给这些生物以致命的打击。

众所周知, 大风是空气运动产生的自然天气现象, 是大气运动规律所决定的, 无论是

低压、槽、温带气旋,还是源于热带海洋的台风(飓风),以致某些局地性风暴,人的力量都是不能控制的。但建设防风设施是一种减轻源对汇威胁和危害的有力措施。从具体防御机理上,包括试验模拟,有许多人做过研究,在国外的早期研究者有德国的 Geiger,前苏联的 Сапожникова, Мачадин, 美国的 Rosenberg, 日本的真木太一;我国 20 世纪的研究者有江爱良、严开伟、朱廷曜、朱劲伟、袁嘉祖、张翼、金昌杰、关德新等。防风设施的类型主要有:各种防护林、防风障、防风网等。由于这些设施——无论是生物的或者是非生物的——都有一定的使用年限,平时要维护,到一定时间要更新。那么,就有一个选择什么时候更新最为有利的问题,早了浪费,造成不必要的经济损失,晚了起不到防风作用,使农作物等遭受危害。用 Понтрягин 极大值原理进行生态控制是一种合理可行的途径。

设 $x(t)$ 是防风设施在时刻 t 的现时价值;

$u(t)$ 是单位时间(通常取作 1a)的维护费用;

$g(t)$ 是维护效用函数(每支出 1 元钱的维护费用所增加的防护设施价值);

$d(t)$ 是时刻 t 的废弃函数;

π 是生产率(投入资金效率),假定是一个常数。

上述 $g(t)$ 是一个减函数, $d(t)$ 是一个增函数。

这一系统的状态方程和目标函数分别是

$$\frac{dx}{dt} = -d(t) + g(t)u(t) \quad x(0) = x_0 \quad (4-50)$$

和

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} [\pi x(t) - u(t)] e^{-\delta t} dt + x(t_f) e^{-\delta t_f} \quad (4-51)$$

式中, δ 是贴现因子(参见《生态动力学》第十一章, 科学出版社, 2001)。假设防护设施的防护效益与其现时价值成正比, 那么, 以上目标函数的经济意义是: 防护设施的防护效益减去维护费用的总贴现值与现时价值的贴现值两者之和。上述的最优生态控制问题, 于是就成为如下的控制问题。

在约束条件

$$0 \leq u(t) \leq U$$

之下, 求使 $J(u)$ 取得最大值的 u 值。

这一问题的 Hamilton 函数与协态方程分别是

$$H = (\pi x - u) e^{-\delta t} + \lambda(-d + gu) \quad (4-52)$$

和

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\pi e^{-\delta t} \quad \lambda(t_f) = e^{-\delta t_f}$$

因为 t_f 是自由的, 所以还要附加必要条件

$$-\delta e^{-\delta t_f} x(t_f) = -H|_{t_f}$$

用分离变量法求解协态方程, 我们得到

$$\lambda(t) = e^{-\delta t_f} + \frac{\pi}{\delta} [e^{-\delta t} - e^{-\delta t_f}] \quad (4-53)$$

依极大值原理可知, Hamilton 函数作为 u 的函数, 应在 u^* 取得最大值。

由于

$$H = \pi x e^{-\delta t} - \lambda d + [\lambda g - e^{-\delta t}] u$$

对于 u 来说是线性的, 所以

$$u^* = \begin{cases} U & \text{当 } \lambda g - e^{-\delta t} \geq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } \lambda g - e^{-\delta t} < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-54)$$

或

$$u^* = \begin{cases} U & \text{当 } [e^{-\delta t_f} + \frac{\pi}{\delta}(e^{-\delta t} - e^{-\delta t_f})]g - e^{-\delta t} \geq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } [e^{-\delta t_f} + \frac{\pi}{\delta}(e^{-\delta t} - e^{-\delta t_f})]g - e^{-\delta t} < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-55)$$

由于 $\lambda(t) = \partial J / \partial x$ 是每增加 1 元钱现时价值的边际效益的贴现值, 所以 $\lambda(t)g(t)$ 是在时刻 t 时, 1 元钱的贴现值。所谓对本问题的最优控制, 用通常的语言加以描述, 那就是: 当 1 元钱的附加维护费用的边际收益的贴现值, 大于 1 元钱的贴现值的时候, 便决定采用最大维护费用 U (即投资为 U 的策略), 因为在后一种情形下, 防风设施已经失去被维护的价值。

更新时间 t_s 应由式

$$\{\exp(-\delta t) + \frac{\pi}{\delta} [\exp(-\delta t_s) - \exp(-\delta t_f)]\} g - \exp(\delta t_s) = 0$$

来决定。

上式也可简化写为

$$\exp(-\delta t_s) \left\{ \left[\frac{\pi}{\delta} - \left(\frac{\pi}{\delta} - 1 \right) \exp(\delta(t_s) - t_f) \right] g - 1 \right\} = 0 \quad (4-56)$$

式中, $\pi > \delta$, 否则, 该防风设施就完全没有生态动力意义了。由于 $g(t)$ 是 t 的减函数, 所以上式中大括号内的函数也是时间 t 的减函数。这样一来, 上式左边的函数只能是由正到负。于是, 所求的最优控制策略就是

$$u^* = \begin{cases} U & \text{当 } 0 \leq t \leq t_s \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } t_s \leq t \leq t_f \text{ 时} \end{cases} \quad (4-57)$$

下面, 让我们举例加以说明。

设 $U=1$, $x(0)=100$ $d(t)=2$ $\pi=0.1$ $\delta=0.05$ 以及

$$g(t) = \frac{2}{(1+t)^{1/2}}$$

于是, t_s 由如下方程决定

$$0.1 - 0.05 \exp[-0.05(t_f - t_s)] = 0.025 \sqrt{1+t_s}$$

或

$$\sqrt{1+t_s} = 4 - 2 \exp[-0.05(t_f - t_s)]$$

这里的 t_s 和 t_f 都是待求的。为了决定 t_f , 需进一步计算 $x(t)$ 。

当

$$t < t_s$$

时, $u^* = 1$, 状态方程化为

$$\frac{dx}{dt} = -2 + \frac{2}{\sqrt{1+t}}$$

对于上式,从 0 到 t ,对两边作积分,得到

$$x(t) - x(0) = -2t + 4(1+t)^{1/2} \Big|_0^t$$

$$x(t) = -2t + 4(1+t)^{1/2} + 96$$

当 $t > t_s$ 时, $u^* = 0$, 状态方程化为

$$\frac{dx}{dt} = -2$$

现有

$$\int_0^t \frac{dx}{dt} dt = \int_0^{t_s} \left[-2 + \frac{2}{\sqrt{1+t}} \right] dt + \int_{t_s}^t (-2) dt$$

即

$$x(t) = -2t_s + 4\sqrt{1+t_s} + 96 - 2(t - t_s) = 4\sqrt{1+t_s} + 96 - 2t$$

因此,我们有

$$x(t_f) = 4\sqrt{1+t_s} + 96 - 2t_f$$

为了确定 t_f , 必须增加一个条件,例如

$$x(t_f) = 40$$

于是得出

$$4\sqrt{1+t_s} + 96 - 2t_f = 40$$

$$2t_f = 4\sqrt{1+t_s} + 56$$

$$t_f = 2\sqrt{1+t_s} + 28$$

把上式代入前面含有 t_s 和 t_f 的关系式,便可消去 t_f ,并得到

$$\sqrt{1+t_s} - 4 + 2\exp\{-0.05[2(1+t_s)^{1/2} + 28] - t_s\} = 0$$

应用二元搜寻程序,可以求出 $t_s = 10.6$,再将其代入上列的 t_f 表达式,我们得出

$$t_f = 34.8$$

这样,所求得的最优策略是

$$u^* = \begin{cases} 1 & \text{当 } 0 \leq t \leq 10.6a \\ 0 & \text{当 } 10.6a < t \leq 34.8a \end{cases}$$

四、水库生态经济效益的最优控制

水资源是水文生态动力源的最重要的组成部分。对于水资源的优化控制,事实上自古以来有之。据有关资料,早在公元前 16 世纪,已有关农田沟洫工程的文字记载。在春秋、战国时期,已经建设了淮河流域的芍坡、黄河流域的引漳 12 渠等著名水利工程。公元前 250 年,李冰主持建成都江堰灌区,今灌溉面积已达 $10^3 \times 10^4$ 亩 ($1 \text{ 亩} = 0.0667 \text{ hm}^2$)。现在全国各地的大小水库星罗棋布。但以往在许多地区,在修建水利设施时,只注重工程设计而缺乏关于生态系统方面论证,甚至设计时根本没有生态学家参与,导致因没有考虑生态建设而造成了不应有的损失,教训惨痛。比如,晋西有 28 个县,到 1979 年,已建成水库 110 座,报废竟达 1/3。黄河中、上游,7 座大型水库、库容已淤积 40%,全流域已报废水库 1/3。20 世纪 80 年代,由于人们认识到这些问题,后来注重了水文生态动力源中有意义的水库生态问题研究,在《生态动力学》中,已讲到作者对盘锦水库作了

研究。水库的最优控制是科学调度的依据。

设有一座水库,水位是 $x(t)$,水流入库速度是 $u(t)$ 。如果水库中的水量损失(含渗漏、蒸发等原因造成的水量损失)的速度是 $0.1x(t)$ 。那么,该水库的数学模型可以写成如下形式:

$$\frac{dx}{dt} = -0.1x(t) + u(t) \quad (4-58)$$

假定水流入水库的最高速度不超过 \bar{u} ,则约束条件为

$$0 \leq u(t) \leq \bar{u}$$

这样,水库的管理问题就可以有下列三种提法:

①求最优管理策略,使 100d 内水库的平衡水位保持最高,即求 $u(t)$,以使目标

$$J_1 = \int_0^{100} x(t) dt$$

取得最大值。

②该问题基本上与①相同,但要附加如下的约束条件

$$\int_0^{100} u(t) dt = k$$

式中, k 是一个给定常数,也就是限定在 100d 内存储在水库中的水量是 k 。这样提法可能更合理些,因为对于第一种提法来说,其结果可能是 $u(t)$ 一直取最大值 \bar{u} 。

③求最优策略 $u(t)$,使在水库的总储水量为 k 的条件下,水库在第 100 天的时刻水位最高,即求 $u(t)$,使

$$J_2 = x(100)$$

取得最大值。

下面我们用 Понтрягин 最大值原理来解以上三个问题。

为对①求解,我们首先写出如下形式的 Hamilton 函数

$$H(x, \lambda, u, t) = x + \lambda(-0.1x + u) \quad (4-59)$$

由 Понтрягин 最大值原理可知, u^* 应当使

$$H(x, \lambda, u, t)$$

取得最大值。

让我们取

$$u^* = \begin{cases} 0 & \text{当 } \lambda < 0 \text{ 时} \\ \bar{u} & \text{当 } \lambda \geq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-60)$$

这一控制问题的协态方程:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -1 + 0.1\lambda \quad (4-61)$$

由于 $x(100)$ 是自由的,因此,由变分法动态最优控制,正则的边界条件

$$x(t_0) = x_0 \quad \lambda(t_f) = \frac{\partial \theta[x(t_f), t_f]}{\partial x(t_f)}$$

(其中 $\theta[x(t_f), t_f]$ 是系统目标函数第一项,详细推导见变分法方面的书籍)可知, $\lambda(t)$ 满足边界条件的解是

$$\lambda(t) = 10[-\exp(0.1t - 10) + 1] \quad (4-62)$$

在区间 $[0, 100]$ 内 $\lambda(t) \geq 0$, 则最优控制策略是在其区间内取 $u^* = \bar{u}$, 这在预料之中。

下面讨论②的求解过程。

与①不同的是,它增加了如下限制条件

$$\int_0^{100} u(t)dt = k$$

现今

$$x_1(t) = x(t)$$

及

$$x_2(t) = \int_0^t u(t)dt \quad (4-63)$$

对式(4-63)的等号两边求导,得到

$$\frac{dx_2}{dt} = u$$

于是,系统的状态方程须改写为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -0.1x + u \\ \frac{dx_2}{dt} = u \end{cases} \quad (4-64)$$

$$x_2(0) = 0, \quad x_2(100) = k$$

其目标函数仍为 J_1 。

这一问题的 Hamilton 函数是

$$\begin{aligned} H(x, \lambda, u, t) &= x_1 + \lambda_1(-0.1x_1 + u) + \lambda_2 u \\ &= x_1 - 0.1\lambda_1 x_1 + (\lambda_1 + \lambda_2)u \end{aligned} \quad (4-65)$$

根据 Понтрягин 最大值原理, u^* 应使 Hamilton 函数取得最大值。因而,最优控制决策是

$$u^* = \begin{cases} 0 & \text{当 } \lambda_1 + \lambda_2 < 0 \text{ 时} \\ \bar{u} & \text{当 } \lambda_1 + \lambda_2 \geq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-66)$$

而相应的协态方程是

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = 0.1\lambda_1 - 1 & \lambda_1(100) = 0 \\ \frac{d\lambda_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = 0 \end{cases} \quad (4-67)$$

其解分别为

$$\lambda_1(t) = 10[1 - \exp(0.1t - 10)]$$

和

$$\lambda_2(t) = \text{const} \quad (4-68)$$

由于

$$\lambda_1'(t) = -\exp(0.1t - 10) < 0$$

$\lambda_1(t)$ 单调减小, 以及

$$\lambda_2(t) = \text{const} \quad (4-69)$$

所以,我们可以假设 u^* 先取 \bar{u} , 然后在时刻 t_s 切换为 $u^* = 0$ 。

求这一切换的步骤是:

令 $u(t) = \bar{u}$, 并将其代入状态方程, 我们可以得出

$$x_2(t) = \begin{cases} \bar{u}t + C_1 & \text{当 } 0 \leq t \leq t_s \text{ 时} \\ C_2 & \text{当 } t_s < t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-70)$$

由 $x_2(0) = 0$ 和 $x_2(100) = k$, 即可求出 $C_1 = 0, C_2 = k$ 。

因此, 上式可以改写为

$$x_2(t) = \begin{cases} \bar{u}t & \text{当 } 0 \leq t \leq t_s \text{ 时} \\ k & \text{当 } t_s < t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-71)$$

再由

$$\bar{u}t_s = k$$

我们得到

$$t_s = \frac{k}{\bar{u}}$$

于是, 问题②的最优管理策略是

$$u^* = \begin{cases} \bar{u} & \text{当 } 0 \leq t \leq \frac{k}{\bar{u}} \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } \frac{k}{\bar{u}} < t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-72)$$

下面讨论③的解。

这一问题的 Hamilton 函数是

$$\begin{aligned} H(x, \lambda, u, t) &= \lambda_1(-0.1x_1 + u) + \lambda_2 u \\ &= -0.1\lambda_1 x_1 + (\lambda_1 + \lambda_2)u \end{aligned} \quad (4-73)$$

由 Понтрягин 最大值原理, u^* 应使 H 取得极大值, 而

$$u^* = \begin{cases} \bar{u} & \text{当 } \lambda_1 + \lambda_2 \geq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } \lambda_1 + \lambda_2 < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-74)$$

现在, 协态方程成为如下形式

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_1}{dt} = 0.1\lambda_1 \\ \frac{d\lambda_2}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4-75)$$

解以上方程组, 得到

$$\begin{aligned} \lambda_1(t) &= \exp(0.1t - 10) \\ \lambda_2(t) &= \text{const} \end{aligned} \quad (4-76)$$

因为 $\lambda_1(t)$ 是单调增加的, $\lambda_2(t)$ 是常数, 所以 u^* 须先取为零, 然后在时刻 t_s 切换为最大允许值 \bar{u} , 即

$$u^* = \begin{cases} 0 & \text{当 } 0 \leq t < t_s \text{ 时} \\ \bar{u} & \text{当 } t_s \leq t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-77)$$

这样, 状态方程就成为

$$\frac{dx_2}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{当 } 0 \leq t < t_s \text{ 时} \\ \bar{u} & \text{当 } t_s \leq t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-78)$$

求其解, 得到

$$x_2(t) = \begin{cases} C_1 & \text{当 } 0 \leq t < t_s \text{ 时} \\ \bar{u}t + C_2 & \text{当 } t_s \leq t \leq \bar{t} \text{ 时} \end{cases}$$

由 $x_2(0) = 0$, 得到 $C_1 = 0$ 。

再由 $x_2(100) = K$, 得到:

$$C_2 = k - 100\bar{u}$$

于是, 可以得出:

$$x_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{当 } 0 \leq t < t_s \text{ 时} \\ \bar{u}t + k - 100\bar{u} & \text{当 } t_s \leq t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-79)$$

当 $t = t_s$ 时, 有

$$\bar{u}t_s + k - 100\bar{u} = 0$$

所以

$$t_s = 100 - \frac{k}{\bar{u}}$$

因此, 这一问题的最优策略是

$$u^* = \begin{cases} 0 & \text{当 } 0 \leq t < 100 - \frac{k}{\bar{u}} \text{ 时} \\ \bar{u} & \text{当 } 100 - \frac{k}{\bar{u}} \leq t \leq 100 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-80)$$

根据 Понтрягин 最大值原理, 向水库进水的最优策略得出后, 可依结论实施。这就是在已有资料和当前认识水平下, 优化控制水文生态动力源以满足生物对水分需求的一种最优的调度方案。因为水库中养殖的鱼等水生生物, 水必须保证, 另一方面, 水库蓄水, 是为灌溉农田提供水文生态动力源的基础。此外, 水库还有发电等非生物性的效益, 而防汛功能也有保障农田、林地、草场等不受损失的生物意义。此时, 放水调度, 则需结合应用马氏决策规划方法。

五、害虫、天敌和农药系统的最优生态控制

在《生态动力学》一书第十七章, 论述了生物防治的生态动力问题。研究害虫生态系统规律最终目标在于防治, 包括人类活动的农药防治。如何处理好害虫、生物防治与农药防治, 是调节三者关系, 使生态动力的源-汇关系保持最优的一种生态控制问题。

上述的三者关系, 用如下的微分方程组来描述

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(\alpha_1 - \beta_1 y) - b_1 x u(t) \\ \frac{dy}{dt} &= y(\beta_2 x - \alpha_2) \end{aligned} \quad (4-81)$$

式中, $x(t)$ 是害虫总数, $y(t)$ 是天敌(捕食该类害虫的动物)的总数, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, b_1$ 都是正的常数, $u(t)$ 是使用理想杀虫剂(系指只杀该种害虫, 而不杀该种害虫的天敌)的速度。

在不使用杀虫剂时, 即 $u = 0$ 时 $x = \alpha_2/\beta_2, y = \alpha_1/\beta_1$ 是该系统的平衡点; 这是因为, 当 $x(t_0) = \alpha_2/\beta_2, y(t_0) = \alpha_1/\beta_1$ 时, 上述方程组的解是 $x(t) \equiv \alpha_2/\beta_2, y(t) \equiv \alpha_1/\beta_1$ 。这种情况对农作物不致造成很大危害。然而, 如果由于某种原因, 上述的平衡状态被破坏

了,就会使害虫增加,危害农作物,这时就要使用农药来杀害虫。这一问题的最优控制方案是:如果在使用农药的允许速度范围内(即 $0 \leq u(t) \leq \bar{u}$),求出一个最优策略 $u(t)$,使农作物因虫害而受到损失最小。这也就是说,通过求出 $u(t)$,使

$$J(u) = \int_0^{t_f} (cx + ru) dt \quad (c > 0, r > 0) \quad (4-82)$$

取得最小值。在式(4-82)中, cx 是害虫给农作物造成的损失,它与害虫的总数成正比, ru 是使用杀虫剂所耗去的费用,其中包括购买杀虫剂和使用农药过程中所耗工时等的费用。

为了便于表达起见,下面假设 $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = b_1 = 1$ 。这时,状态方程简化为

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(1-y) - ux \\ \frac{dy}{dt} &= y(x-1) \end{aligned} \quad (4-83)$$

再令 $r=1$,则目标函数可简化为

$$J(u) = \int_0^{t_f} (cx + u) dt \quad (c > 0) \quad (4-84)$$

具体计算过程如下:

先写出 Hamilton 函数:

$$H(x, \lambda, u, t) = cx + u + \lambda_1 [x(1-y) - ux] + \lambda_2 [y(x-1)] \quad (4-85)$$

由 Понтрягин 最大值原理可知,最优管理策略 u^* 应当使这一 Hamilton 函数取得最小值,即

$$u^* = \begin{cases} 0 & \text{当 } 1 - \lambda_1 x > 0 \text{ 时} \\ \bar{u} & \text{当 } 1 - \lambda_1 x < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-86)$$

该系统的正则方程组是

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-y) - ux \\ \frac{dy}{dt} = y(x-1) \end{cases} \quad (4-87)$$

而相应的协态方程组则是

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -c - \lambda_1(1-y-u) - \lambda_2 y \quad (4-88)$$

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial y} = \lambda_1 x - \lambda_2(x-1) \quad (4-89)$$

其平衡点是 $x=1, y=1$ 。如果我们把 $t_f, \lambda_1(t_f), \lambda_2(t_f)$ 作为参数,从 $x(t_f)=1, y(t_f)=1$ 出发,反时针方向求解正则方程,可以得到一个如图 4-5 所示的在 $x-y$ 平面上的相平面图。

由图 4-5 可知,如果初始状态 $(x(0), y(0))$ 在点 G_1 ,最优控制策略应先取 $u=0$,即先使用杀虫剂。直到系统状态达到曲线 PB ,然后切换为 $u=\bar{u}$,即可用允许的最高速度使用杀虫剂。这样,方可使害虫给农作物造成的总的经济损失保持最轻状态。如果初始状态在点 G_2 ,则取 $u=\bar{u}$,直到系统与曲线 PA 相交,然后切换为 $u=0$ 。再在系统状态与曲线 PB 相交时,切换为 $u=\bar{u}$,直到抵达平衡点 P 为止。

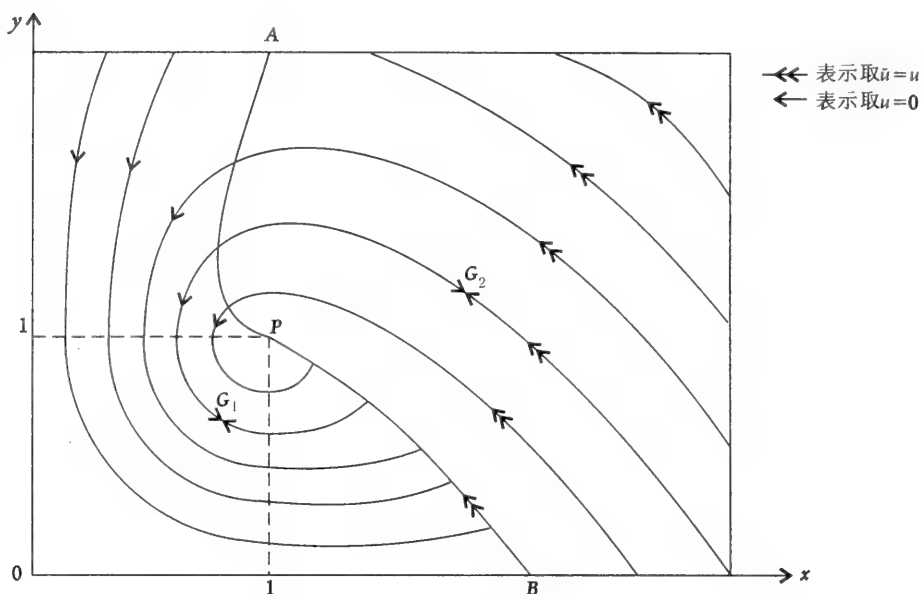


图 4-5 害虫—农药生态控制系统的最优控制

对于根据 Понтрягин 最大值原理计算得出的生态控制过程,可以做出如下解释:

第一种情形说明,当害虫不多的时候,可以先采用生物防治的方法,即依靠害虫的天敌来捕食害虫,而不使用农药;而当害虫增加到一定程度时,即用允许最大杀虫剂量来杀灭害虫。这样做不仅可以使总损失最小,而且可以在暂不使用农药的时候,减轻农药对农产品的污染,有利于提高农产品质量,有利于农作物生态环境的保护。

第二种情形说明,当害虫已经发展到数量很多的时候,那就要求:从防治伊始,即使用最大的杀虫剂量来杀灭害虫,直到害虫减少到一定程度,才停止用农药。如果在停止使用杀虫剂后,害虫再次增加,达到与曲线 PB 相交的程度时,必须再一次地使用允许的最大杀虫剂量,直至平衡状态为止。

第三种情形说明,如果初始状态落在曲线 PB 上,那么一开始就须使用可允许的最大杀虫剂量,一直到平衡状态为止,而不需要切换。

这里所述的害虫—农药—作物生态系统,在植物保护业务中无疑是有实用价值的。但因涉及高等数学,以致相当一部分植保人员望而生畏,故在我国基层尚少用于防虫工作。正确的办法是制成图表,即使农户也可以使用。但是控制计算的问题很复杂,得出准确而实用的结果,并非轻而易举,控制系统的最优性,更不可能一蹴而就,何况目前尚属于试验阶段,用户应该积极支持并配合防虫生态控制方案的设计,试用中发现问题,及时帮助设计者改进,使之渐臻完善。

六、肥料施用的生态控制策略

肥料是植物的重要营养生态动力源。施肥的目的,最直接的是提高作物的生态产量;但与此同时,必须考虑肥料的长远作用问题,尤其要考虑施肥对土壤的影响。这样,从所施用的肥料种类来说,应该合理搭配。现假设某一农业生产单位,所用肥料分为两类:甲类为对土壤有长远意义的肥料(厩肥)占的比例较大,化学肥料占的比例较小,我们称之为“生态肥”。乙类为化学肥料占的比例较大,而厩肥比例较小,我们称之为“速效

肥”。如果多用一些“生态肥”，虽然有利于长远地增加土壤的生态动力正效应，但不利于当年增产。反之，多用一些“速效肥”，有利于当年增产，但影响长远性的土壤生态动力正效应，不利长远增产。

如果 $E(t)$ 表示在时刻 t 施用“生态肥”的量； $R(t)$ 表示在时刻 t 施用“速效肥”的量； g 是单位“生态肥”的增产（指生态产量）效果； δ 表示退出率（即由于某种原因，未能施肥的比率）； β 表示施用“生态肥”的百分比。

该系统的状态方程可以写成

$$\begin{cases} \frac{dE(t)}{dt} = \beta g E(t) - \delta E(t) & E(t_0) = E_0 \end{cases} \quad (4-90)$$

$$\begin{cases} \frac{dR(t)}{dt} = (1 - \beta) g E(t) - \delta R(t) & R(t_0) = R_0 \end{cases} \quad (4-91)$$

施用两种肥料的最优生态控制策略问题，可采用如下两种问题之一。

其一，在约束条件

$$\beta_0 \leq \beta \leq \beta_1$$

之下，求 β ，使到第 t_1 年累计施用“速效肥”总量 $E(t_1) + R(t_1)$ 为最多。

其二，在约束条件

$$\beta_0 \leq \beta \leq \beta_1$$

之下，求 β ，使累计“生态肥”达 E_1 且累积“速效肥”总量达到 R_1 所经历的时间最短。

一个数字的例子是：

设 $E(0) = 100 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $R(0) = 80 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $\beta_0 = 10\%$ ， $\beta_1 = 60\%$ ， $g = 1.4$ ， $\delta = 2\%$ ，求 β 使 $E_1 = 240 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $R_1 = 240 \times 10^4 \text{ kg}$ 所经历的时间长度为最短。

应用 Понтрягин 最大值原理，得出最优生态控制策略是

$$P = \begin{cases} 60\% & \text{当 } 0 \leq t \leq 11.2a \text{ 时} \\ 10\% & \text{当 } 11.2a < t \leq 15.5a \text{ 时} \end{cases}$$

即在前 11.2a 施用 60% 的“生态肥”；到第 11.2 年改变为施用 10% 的“生态肥”，这样，在第 11.2 年到第 15.5 年间，即在 $15.5a - 11.2a = 4.3a$ 内按 10% “生态肥”策略，便可在第 15.5 年，使两种肥料对土壤的投入都达到 $240 \times 10^4 \text{ kg}$ 。

七、生态县(乡)建设科技基金的最优管理

关于生态与经济关系问题，在《生态动力学》中已有许多研究。在生态县(乡)建设中，基金管理的重要性，已为政府官员和生态专家关注。为了使资金在长远建设中充分发挥作用，须用科学方法作出合理决策，把有限的资金及时合理地用到该资助的县(乡)，促进生态县(乡)建设。

如果某生态县获得了一笔生态建设科技基金，总计 200 万元，基金会把它存入银行，年利率为 10%。这笔科技基金计划用 60a，到第 60a 后，要求只剩下 3 万元作为处理基金会结束有关事宜的费用。根据基金会的需要，每年至少要支取 15 万元到 40 万元作为项目运行费。现在问题就是：求出该基金的最优管理策略，以使基金会从银行取走的作为项目运行的费用最多。

该控制系统的数学模型为

$$\frac{dx}{dt} = -rx - u(t) \quad r = 0.1 \quad (4-92)$$

这里 $x(t)$ 是基金会存在银行的钱数, $u(t)$ 是每年支出的钱数。

初始值: $x(0) = 2000000$

终值: $x(60) = 30000$

控制约束为

$$150000 \leq u(t) \leq 400000$$

目标函数为

$$J(u) = \int_0^{60} u(t) dt \quad (4-93)$$

于是, 基金会的最优管理问题就是: 求最优管理策略 $u(t)$, 使基金会在 60a 内从银行取走的总钱数 $J(u)$ 最多 (或者使 $-J(u)$ 最小)。

现将目标函数改写为

$$J(u) = - \int_0^{60} u(t) dt \quad (4-94)$$

下面我们用 Понтрягин 最大值原理来求解这一问题。首先, 让我们写出 Hamilton 函数: $H = -u + \lambda(rx - u) = r\lambda x - (1 + \lambda)u$, 再由 Понтрягин 最大值原理, 最优管理策略 u^* 应当使 Hamilton 函数 H 作为 u 的函数取得最小值。由 Hamilton 函数 H 的表达式, 我们可以写出

$$u^* = \begin{cases} 150000 & \text{当 } \lambda + 1 < 0 \text{ 时} \\ 400000 & \text{当 } \lambda + 1 \geq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-95)$$

这一问题的正则方程是:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx - u & x(0) = 2000000 \\ \frac{d\lambda}{dt} = -r\lambda & x(60) = 30000 \end{cases} \quad (4-96)$$

上面的方程组中第二个方程为协态方程, 协态方程的解是

$$\lambda(t) = \lambda(0)\exp(rt)$$

如果 $\lambda(0) > -1$, 那么 $\lambda(t) > -1$, $u^* = 400000$, 这时状态方程是

$$x(t) = x(0)\exp(rt) - \int_0^t \exp[r(t-\tau)]400000 d\tau \quad (4-97)$$

由式(4-97)可以算出 $x(60) < 0$, 这个结果不符合给定的终端条件。

如果 $\lambda(0) < -1$, 那么 $\lambda(t)$ 将由 < -1 改变到 > -1 , 此时的最优管理策略是

$$u^* = \begin{cases} 150000 & \text{当 } 0 \leq t < t_s \text{ 时} \\ 400000 & \text{当 } t_s \leq t \leq 60 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-98)$$

其中 t_s 是 $\lambda(t) = -1$ 的时刻。

这样, 在区间 $[t_s, 60]$ 内, 由状态方程, 我们有

$$x(t) = C\exp(rt) + \frac{400000}{r} \quad (4-99)$$

把边界条件 $x(60) = 30000$, $r = 0.1$ 代入, 得到

$$C = \exp(-6)(30000 - 4000000) = -3970000e^{-6}$$

这样一来, 在区间 $[t_s, 60]$ 内, 就有

$$x(t) = -3970000\exp[0.1 \times (t - 60)] + 4000000 \quad (4-100)$$

在区间 $[0, t_s]$ 内,状态方程为

$$\frac{dx}{dt} = 0.1x - 150000 \quad x(0) = 2000000$$

其解为

$$\begin{aligned} x(t) &= 2000000e^{0.1t} - 150000 \int_0^t \exp[0.1(t-\tau)]d\tau \\ &= 500000e^{0.1t} + 1500000 \end{aligned} \quad (4-101)$$

令以上两式中 t_s 相等,则有

$$-3970000e^{0.1(t_s-60)} + 4000000 = 500000e^{0.1t_s} + 1500000$$

得到 $t_s \approx 15.9$ 。因此本问题的最优管理策略是:

$$u^* = \begin{cases} 150000 & \text{当 } 0 \leq t < 15.9 \text{ 时} \\ 400000 & \text{当 } 15.9 \leq t \leq 60 \text{ 时} \end{cases} \quad (4-102)$$

八、讨论与展望

Понтрягин 最大值原理在生态优化控制中的应用是多方面的。近年来,新发展起来的一些优化控制的设计方法,预期可能在生态控制中派上用场。下面,仅从原则上谈一些看法,并展望其应用前景。 H_∞ 控制是其中的一种,下面结合我们的研究对此加以说明。

图 4-6 是 H_∞ 控制的一个简单的示意图。 G 是一个生态控制系统,它有两部分输入,分别记作 w 与 u , w 称为干扰输入,它是由一些不能被人们所操作的外部干扰所形成的,比如水旱灾害对农林牧作物干扰,如台风对森林的干扰,气候变暖对陆地冰川的直接干扰,对河流水生生物的干扰,El Nino 和 La Nina 对全球海洋水文与气候生态的干扰。 u 是控制输入,它是由生态工作者设计的,旨在优化生态环境,提高生态动力源正效应的有意识的以人工生态动力源对生态系统的控制。与此同时,系统的输出也有两部分,一个是 z ,一个是 y , z 叫调节输出,它通常反映了系统的误差,如跟踪误差,调节误差等,用来反映系统的实际运行情况同理想情况之间的差值。比如,在闭合系统中, y 称为量测输出,用以描述系统状态的度量值,它实际上起着我们以前所说的普通输出作用。

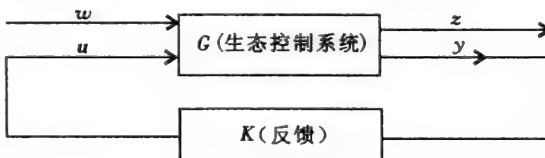


图 4-6 H_∞ 生态控制框图

显然我们希望反映系统误差的调节输出越小越好。但是,这不能完全由我们的主观愿望来确定。因为在生态系统中有许多不能由人的干预而决定的自然产生的干扰输入。那么,为达到上述目标,人们只能希望,调节输出相对于干扰输入,应尽可能地小。

有一种称为 H_∞ 模的工具被用以测量输入、输出的大小。这就是 H_∞ 控制这一名称的来源。

由于种种计算和工程实施方面的原因,常常难以求得生态上最优的 H_∞ 控制。于是退而求其次,只要求“调节输出对干扰输入”之比值,不大于某个给定的允许值。这样,生态系统控制问题就变成 H_∞ 次优控制问题。

上述的关于 H_∞ 最优或次优控制问题的原理和方法是加拿大数学家 Zames 提出来的。由于该方法设计出来的控制器在许多方面具有很强的抗干扰性,在工业技术上的应用,发展迅速。从生态控制问题来说,由于客观干扰极为复杂,应用起来不像用于工程问题那样得心应手。但是,从原则上来说,生态工作者可以通过简化,把许多不同类型的生态控制问题都转化为标准的 H_∞ 问题,以解决生态学研究 and 建设中的控制问题。

H_∞ 在开始时,用于线性系统。后经拓展推广,使其有可能用于非线性系统。但当 H_∞ 推广非线性系统中去的时候,出现了问题。因为线性 H_∞ 方法在设计上方便之处,在于寻找最优控制会归结为求解一两组被叫做 Riccati 方程的代数方程组问题。因此容易求解。而非线性系统则不然,对应于线性的 Riccati 方程,它会导致一个被叫作 Hamilton-Jacobi-Issacs 的不等式,而该不等式在一般情形下是很难求解的。因此,我们可以说,对于非线性系统, H_∞ 方法尽管已经取得了许多有意义的理论结果,但对于生态控制系统,生态工作者尚未找到行之有效的设计方法,还有许多未知数,摆在数学、系统科学和生态工作者面前。今天,我们认识到其困难,是一件好事,原因是提出问题比解决问题还要困难嘛!相信,只要多学科交叉,协力奋斗,解决这一问题的时间也许不会特别久远。

第四节 Bellman 动态规划原理在最优生态控制中的应用

Bellman 的动态规划原理(最早的专著是 R. Bellman, *Dynamic Programming*, Princeton University Press, 1957)是现代控制理论的另一个里程碑,也是规划论中的一种重要的数学规划方法,关于它在生态中的某些应用,《生态动力学》(科学出版社,2001)第十一章有所论述。这里专门从控制理论角度论述其在生态控制中的应用策略并举例说明,而关于它的基本原理来源(最优路径等问题)在许多书籍中都有详述,读者可去查阅。

一、方法概要

动态规划是用来求解有多阶段决策问题的一种有效方法。它把一个多阶段问题分解为一系列的子问题,然后由第一个子问题开始,逐步求解各个子问题。在每一个嵌套的子问题中,只含有一个或两个决策变量,从而使问题大为简化。该方法具有理论简单、应用面广等特点。比如说一个过程有 n 个阶段,第 i 个阶段是从 k_{i-1} 个点出发,到达可能的 k_i 个点。为此,穷举法要作 $(n-1)k_1k_2\cdots k_{n-1}$ 次加法,而动态规划只须作 $k_0k_1+k_1k_2+\cdots+k_{n-2}k_{n-1}$ 次加法。假定 $n=10, k_1=k_2=\cdots k_{n-1}=3$, 即每个阶段都有 3 个选择。当然我们总假定 $k_0=k_n=1$, 即起点,终点是唯一,这样穷举法要算 $(n-1)k_1k_2\cdots k_{n-1}=(10-1)\times 3\times 3\times 3\times 3\times 3\times 3\times 3\times 3\times 3=177147$ 次,而动态规划只要算 $k_0k_1+k_1k_2+\cdots+k_8k_9=1\times 3+3\times 3+3\times 3+3\times 3+3\times 3+3\times 3+3\times 3+3\times 3+3\times 3=75$ 次。可见该方法的有效性。但该方法也有其缺陷。当阶数很高、变量很多时,对计算机存储量和运算速度要求较高,因而往往需要用大型计算机。但在近年,随着计算机日新月异的发展,上述缺陷不成其为问题了。

二、土地资源分配问题

假如有一片荒地,欲投资开发,经过生态专家及有关其他方面的大农业专家进行综

合考察,认为开发该荒地有重要的生态经济意义。对这一点,专家们达成共识。但是重点开发什么项目?这些项目各投资比例多少?意见纷纭。生态学家和林学家强调植树造林,畜牧专家强调种草,农作物育种栽培专家强调发展旱田。从定性经验考虑,往往是以“三一三余一”的决策告终,然而这不符合定量的生态控制原理。

假设有 8 个单位的土地,有林地、草场、旱田三类项目需要利用这些土地。其投资的生态经济效益分别由函数 $g_1(u)$, $g_2(u)$ 和 $g_3(u)$ 给出。其具体数值列于表 4-1。

表 4-1 林地、草场 和旱田项目的生态经济效益

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$u \begin{cases} g_1(u) \\ g_2(u) \\ g_3(u) \end{cases}$	0	5	15	40	80	90	95	98	100
	0	5	15	40	60	70	73	74	75
	0	4	26	40	45	50	51	52	53

这里的土地资源(以土壤生态动力源为主)利用的分配问题,实质上是如何确定三类项目各自的土地利用单位,才能使 8 个单位的土地获得最大的生态经济效益。这是一个静态问题。

设 u_i 为第 i 类项目的投资额; x_i 为考虑到第 i 类项目时,可供利用的土地单位。这样该系统的状态方程为

$$x_{i+1} = x_i - u_i \quad x_1 = 8$$

目标函数为

$$J_3 = \sum_{i=1}^3 g_i(u_i) \quad (4-103)$$

土地分配问题就是求最优利用策略 u_1^*, u_2^*, u_3^* , 以使总的生态经济效益 J_3 达到最大。

第一步,只考虑旱田项目。由于分配给三类项目所利用的土地,把这 8 个单位的土地全都利用完毕,显然取 $u_3^* = x_3$ 。当第一、第二两类项目的土地单位一经确定,第三类项目的利用单位当然只能取剩下的 x_3 了。这时,我们有

$$J_1^*(x_3) = g_3(x_3) \quad (4-104)$$

第二步,对第二、第三这两类项目,作联合考虑。这时,动态规划的基本方程是

$$\begin{aligned} J_2^*(x_2) &= \max_{u_2} \{ g_2(u_2) + J_1^*(x_3) \} \\ &= \max_{u_2} \{ g_2(u_2) + g_3(x_3) \} \end{aligned} \quad (4-105)$$

其状态方程为

$$x_3 = x_2 - u_2$$

把状态方程代入,得

$$J_2^*(x_2) = \max_{u_2} \{ g_2(u_2) + g_3(x_2 - u_2) \} \quad (4-106)$$

其中的 x_2 可取 0, 1, ..., 8 中的任意一个数。按上式计算可得表 4-2。表 4-2 中左边第一列自下至上所示数字,依次表示 $J_2(8), J_2(7), \dots, J_2(1), J_2(0)$ 的各种可能值;在最下面一条形区中 $x_2 = 8$, 而对应不同的 u_2 值,则有不同的 $J_2(8)$ 。例如,自左至右

对于 $u_2 = 0, x_2 - u_2 = 8, J_2(8) = 53$;

对于 $u_2=1, x_2-u_2=7, J_2(8)=57$;
 对于 $u_2=2, x_2-u_2=6, J_2(8)=66$;
 对于 $u_2=3, x_2-u_2=5, J_2(8)=90$;
 对于 $u_2=4, x_2-u_2=4, J_2(8)=105$;
 对于 $u_2=5, x_2-u_2=3, J_2(8)=110$;
 对于 $u_2=6, x_2-u_2=2, J_2(8)=99$;
 对于 $u_2=7, x_2-u_2=1, J_2(8)=78$;
 对于 $u_2=8, x_2-u_2=0, J_2(8)=75$.

比较以上 9 个 $J_2(8)$ 的值, 可以看出在表 4-2 中最右下方的条形区域(我们称为第 1 个条形区域)内, 最大的 $J_2(8)$ 为 110, 即为 $J_2^*(8)=110$ 。同样, 对第 2 个条形区域, 有 $J_2^*(7)=100$ 。余类推, 得表 4-3 的结果。

表 4-2 计算用表 $g_2(u_2) + g_2(x_2 - u_2)$

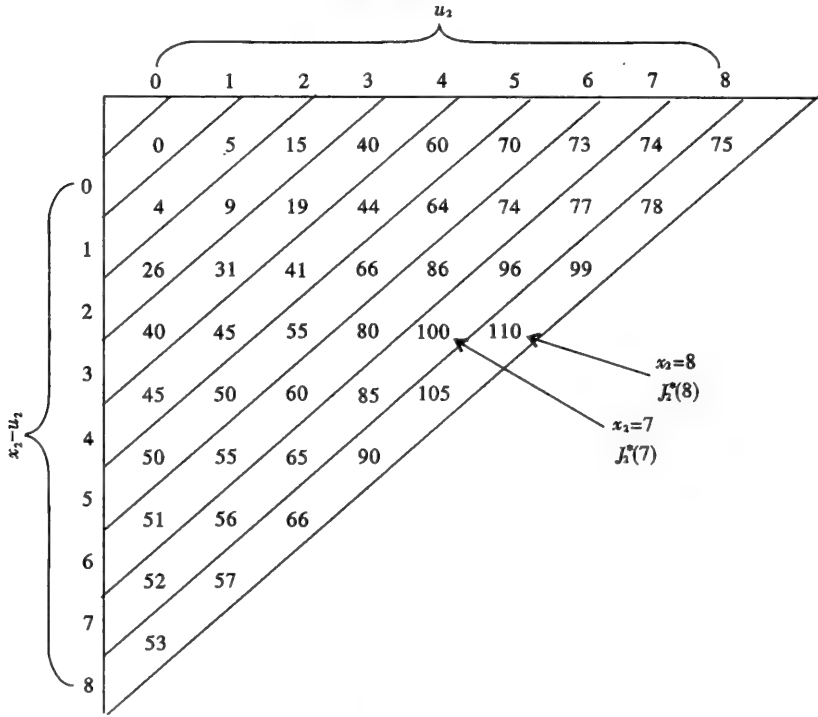


表 4-3 第二步计算结果

x_2	0	1	2	3	4	5	6	7	8
u_2^*	0	1	0	3	4	5	4	4	5
u_3^*	0	0	2	0	0	0	2	3	3
$J_2^*(x_2)$	0	5	26	40	60	70	86	100	110

第三步, 对三类项目一起考虑。
 这时, 动态规划的基本方程为

$$J_3^*(x_1) = \max_{u_1} \{g_1(u_1) + J_2^*(x_2)\} \quad (4-107)$$

状态方程为

$$x_2 = x_1 - u_1$$

把状态方程与 $x_1 = 8$ 代入式(4-107), 我们得

$$J_3^*(x_1) = \max_{u_1} \{g_1(u_1) + J_2^*(8 - u_1)\} \quad (4-108)$$

按式(4-108)列出表 4-4, 看出, $J^*(8) = 140$, $u_1^* = 4$, 因而 $x_2 = 4$; 再由表 4-3 可知 $u_2^* = 4$, 则 $u_3^* = 0$ 。

这样本题的最优决策是: 植树造林用地 4 个单位, 种草项目用地 4 个单位; 旱田项目不用地, 即不列入用地计划之内。

表 4-4 第三步计算结果

u_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$g_1(u_1)$	0	5	15	40	80	90	95	98	100
$J^*(8 - u_1)$	110	100	86	70	60	40	26	5	0
$J_3(x_1)$	110	105	101	110	140	130	121	103	100

从以上计算过程, 可见用于此问题的数据是极为重要的, 可以说生态经济效益的准确与否, 决定结果的精确度。关于生态经济效益计算方法还要继续研究, 可参见《生态动力学》第十一章。由于生态经济效益是一个比较抽象的概念, 所以对于它的定义和计算方法, 至今尚有多方面的争议。我们的意见是应尽量采用先进的数学方法加以计算, 如《生态动力学》一书中所给出的用常微分方程数值解求内利润率的作法可取。但不能满足于那种方法, 今后进一步研究试验, 是必要的。而且现在的计算设备也是允许的。

三、日光温室群总体生态功能优化控制

在霜期农业生产中, 我国创建的日光温室技术, 在 20 世纪 90 年代已上规模, 其中生产的蔬菜、花卉及果树作物, 对于我国北方冬季的果菜市场有举足轻重的作用。近年形成的日光温室群乃是生态技术发挥作用的一种重要手段, 这些在《霜期农业气候学》一书中已有详尽论述。与农田作物生产一样, 在温室群发展起来之后, 不仅考虑其经济和社会效益, 其生态效益也要引起注意。因为温室群连年生产且规模扩大, 土地利用率高, 必然加重土壤负担, 长此以往, 势必要降低土壤中营养生态动力正效应, 并且温室设备等也有一定的消耗。为改变这种状况, 从现在开始既要增加产量, 又要使土壤有充分的休养生息机会。比如, 在北方, 许多日光温室群, 在冬季塑料膜覆盖下的生产, 已使土地在冬季利用率相当高, 而在揭膜后的夏季半年, 不少温室群用地仍被重茬利用。因为生产者认为, 夏季不利用, 使土地闲起来, 会影响经济效益。由于冬、夏施化肥都较多, 会使土壤的生态动力功能减退。土地究竟应利用到何种程度为宜, 即如何处理好日光温室群运行负荷? 这一直是有争议问题。现试用动态规划求解。设土地在冬、夏季利用均为高负荷, 只在春季利用为低负荷。

现有一组日光温室群, 可以在高低两种负荷下进行生产。在高负荷下进行生产时, 产品的年生态产量 S_1 和投入生产的土地面积——按日光温室群的座数计, 假定温室群

中的各个温室的土地面积相等——即温室座数为 u_1 , 并有如下的函数关系:

$$S_1 = g(u_1)$$

温室在生产过程中, 生态功能将会有所下降。如果温室在高负荷时, 年度(温室年度定为 10 月 1 日至次年 9 月 1 日)消耗后生态功能完好率为 a , 即如果年度初生态功能完好的温室有 u 座, 那么到年度末生态功能完好的就剩下 au 座, $0 < a < 1$ 。在低负荷时, 产品年生态产量 S_2 和投入生产的温室座数 u_2 有如下关系:

$$S_2 = h(u_2)$$

相应的温室年度完好率为 b , $0 < b < 1$ 。

假定温室群开始运行时, 温室座数为 x_1 , 要求制定一个温室群 5a 生产与生态功能协调的方案, 在每个年度开始时, 对生态功能完好的温室, 重新安排生产任务, 使其在两种不同的负荷下, 总的生态产量达最高。为了进行具体计算, 我们给出有具体数字的例子。

设温室在高负荷下, 生产的生态产量函数 $S_1 = 8u_1$, 年完好率 $a = 0.7$; 在低负荷下的生态产量函数 $S_2 = 5u_2$, 年完好率 $b = 0.9$ 。在开始时间拥有完好温室数为 1000 座。按照所提出问题的要求, 应安排好 5a 的温室利用方案, 使总生态产量达最高。

为了建立这个问题的动态规划模型, 需要定义几个基本量 k, x_k, u_k 等。用年度表示阶段序数 k , 于是规定第 k 年度初期拥有的完好的日光温室座数为状态变量 x_k , 第 k 年度中分配于高负荷下的温室座数为决策变量 u_k 。因此, $x_k - u_k$ 就是该年度时分配于低负荷下生产的温室的座数。

这里 x_k 和 u_k 均取连续变量。 k 段允许决策集合 $D_k(x_k)$ 可表示为

$$D_k(x_k) = \{u_k | 0 \leq u_k \leq x_k\} \quad (4-109)$$

状态转移方程为

$$x_{k+1} = 0.7u_k + 0.9(x_k - u_k) \quad (4-110)$$

式(4-110)中,

$$k = 1, 2, \dots, 5$$

又设 $R_k(x_k, u_k)$ 为第 k 年的生态产量, 即

$$R_k(x_k, u_k) = 8u_k + 5(x_k - u_k) \quad (4-111)$$

于是, 我们有

$$V_{1,5} = \sum_{k=1}^n v_k = \sum_{k=1}^5 R_k(x_k, u_k) \quad (4-112)$$

$$f_k(x_k) = \max_{u_k \in D_k(x_k)} \{8u_k + 5(x_k - u_k) + f_{k+1}[0.7u_k + 0.9(x_k - u_k)]\} \quad (4-113)$$

式(4-113)中,

$$k = 1, 2, 3, 4, 5$$

从第 5 年度向回逆推计算, 因为不计第 6 年的生态产量, 所以边界条件为

$$f_6(x_6) = 0$$

于是在 $k = 5$ 时, 我们有

$$f_5(x_5) = \max_{0 \leq u_5 \leq x_5} \{8u_5 + 5(x_5 - u_5)\} \quad (4-114)$$

显然, 式(4-114)右端的最大值为

$$u_5^* = x_5$$

即在第 5 年度初,应把一切完好的日光温室全部投入高负荷下生产。于是我们有

$$f_5(x_5) = 8u_5^* + 5(x_5 - u_5^*) = 8x_5 \quad (4-115)$$

在 $k=4$ 时,我们有

$$\begin{aligned} f_4(x_4) &= \max_{0 \leq u_4 \leq x_4} \{8u_4 + 5(x_4 - u_4) + 8[0.7u_4 + 0.9(x_4 - u_4)]\} \\ &= \max_{0 \leq u_4 \leq x_4} \{13.6u_4 + 12.2(x_4 - u_4)\} \end{aligned} \quad (4-116)$$

由此,可以得到

$$u_4^* = x_4$$

相应地,

$$f_4(x_4) = 13.6x_4 \quad (4-117)$$

依次类推,可以求得如下的一组联立结果

$$\left. \begin{aligned} u_3^* &= x_3 \\ u_2^* &= 0 \\ u_1^* &= 0 \\ f_3(x_3) &= 17.5x_3 \\ f_2(x_2) &= 20.8x_2 \\ f_1(x_1) &= 23.7x_1 \end{aligned} \right\} \quad (4-118)$$

计算结果表明,这个问题的最优策略为:前 2 个年度(即 $k=1,2$),应当在年度初把全部完好的日光温室投入低负荷生产,后 3 个年度把全部完好的日光温室投入高负荷生产。这样,所得的生态产量为最高。其生态产量(用生态产量单位 y_s 表示)为

$$f_1(x_1) = 23.7x_1 = 23.7 \times 1000 = 23700(y_s) \quad (4-119)$$

从以上运算得出整个问题的动态规划最优指标函数值和最优策略方案后,还需要反过来确定每年度的状态和具体决策。实际上,第 i 个年度的完好日光温室的状态变量 x_i ($i=2,3,4,5,6$) 是很容易求出的。但是,这种情形下的计算,须从初始端向终端进行。

已知: $x_1 = 1000$ 座,于是得到:

$$x_2 = 0.7u_1^* + 0.9(x_1 - u_1^*) = 0.9x_1 = 900$$

$$x_3 = 0.7u_2^* + 0.9(x_2 - u_2^*) = 0.9x_2 = 810$$

$$x_4 = 0.7u_3^* + 0.9(x_3 - u_3^*) = 0.9x_3 = 567$$

$$x_5 = 0.7u_4^* + 0.9(x_4 - u_4^*) = 0.7x_4 = 397$$

$$x_6 = 0.7u_5^* + 0.9(x_5 - u_5^*) = 0.7x_5 = 278$$

以上所讨论的最优策略过程,初始端状态 x_1 是固定的,即 $x_1 = 1000$ 座日光温室,终点状况 x_6 依所提出的条件,无要求。由此得出的最优决策,称为初始端固定终点自由的最优决策,得出的目标函数值为产品的最高生态产量。显然,在得出 x_k 后, u_k^* 是容易计算出来。

如果终点附加上一定的约束条件,计算结果就会有些差别。实际上,如果日光温室的建筑材料等耐用,温室的结构寿命就长,即框架使用周期长。这就要求我们要保持日光温室群可持续发展,在取得 5 个年度的生态产量最优效益的同时,使一定量的日光温室保持完好。举例说,如果规定在第 5 个年度结束时,完好的日光温室数量为 500 座,问

应作如何安排,才能满足该终点要求的前提下,达到最高生态产量的目标。

根据式(4-112),可以写出:

$$x_6 = 0.7u_5 + 0.9(x_5 - u_5) = 500 \quad (4-120)$$

即

$$u_5 = 4.5x_5 - 2500 \quad (4-121)$$

显然,由于固定了终点的状态 x_6 ,第5个变量 u_5 的允许集合 $D_5(x_5)$ 也有了约束,式(4-120)说明 $D_5(x_5)$ 已退化为一个节点。也就是说,第5个年度投入运行的日光温室的座数,只能由式(4-121)作出一种决策。据此,我们有:

$$f_5(x_5) = 8(4.5x_5 - 2500) + 5(x_5 - 4.5x_5 - 2500) = 18.5x_5 - 7500 \quad (4-122)$$

同理,利用式(4-113),可以求出

$$k=4$$

于是,我们有

$$\begin{aligned} f_4(x_4) &= \max_{0 \leq u_4 \leq x_4} \{8u_4 + 5(x_4 - u_4) + f_5(x_5)\} \\ &= \max_{u_4} \{8u_4 + 5(x_4 - u_4) + 18.5x_4 - 7500\} \\ &= \max_{u_4} \{21.7x_4 - 0.7u_4 - 7500\} \end{aligned} \quad (4-123)$$

为使 $f_4(x_4)$ 取得最大值,须有条件:

$$u_4^* = 0$$

由此得

$$f_4(x_4) = 21.7x_4 - 7500 \quad (4-124)$$

依此类推,可以得出如下一组联立公式:

$$\begin{aligned} u_3^* &= u_2^* = u_1^* = 0 \\ f_3(x_3) &= 24.5x_3 - 7500 \\ f_2(x_2) &= 27.1x_2 - 7500 \\ f_1(x_1) &= 29.4x_1 - 7500 \end{aligned} \quad (4-125)$$

由此可见,为了使终点完好日光温室座数增加到固定数——500座,就应当:只是在前2个年度把完好的日光温室全部投入低负荷生产就不够了;而应当安排在前4个年度中,把完好的日光温室全部投入低负荷生产,而且,即使在第5个年度,也不能把所有完好的日光温室都投入高负荷生产。

将 $x_5 = 656$ 代入式(4-121),只能有: $u_5^* = 4.5x_5 - 2500 = 452$ 座日光温室投入高负荷生产。相应的最优指标为

$$f_1(x_1) = 29.4x_1 - 7500 = 29400 - 7500 = 21900(y_s) \quad (4-126)$$

这是初始端固定在 $x_1 = 1000$, 终点固定在 $x_6 = 500$ 的条件下,用动态规划法求出的最优解,可以看出,因为附加终点约束条件,所以生态产量 $f_1(x_1)$ 比终点自由条件下的相应产量要低些。但有利于温室群后续生产,也就是可持续发展。

上述例子,都是在一定条件下举出的。目的在于说明在生态控制中运用动态规划的最可能的思路和方法。由于生态问题的复杂性,一些最优控制原理的应用难度较大,我们只是尝试。未来的工作,宜从多方面积累与日光温室等措施有关的高负荷、低负荷运行的经验,也可以用数量化方法。只有这样,才有可能为今后的精确提供必要的详细资

料。关于生态产量计算,在《生态动力学》一书第十章已指明,具体运行时,尤其是用于多年生作物,如日光温室内的桃树(辽宁省辽中县李宝田温室为典型)的相应值计算方法,可进一步订正。另一方面,如果成千数百座日光温室构成的温室群中的作物构成复杂,为统一起见,可运用生态产值($= \text{单价} \cdot \text{生态产量} \cdot \text{hm}^{-2}$)进行比较。

关肇直院士早在1980年就指出:“生态学研究生物与环境的相互关系,由于这些相互作用的复杂性,必须运用数学中非线性泛函分析与现代几何(例如分歧理论、突变理论)等工具……”。可见,若建立起生态控制理论并使之完善,不但要有深厚的生态学基础,还要有深邃的数学知识,能应用非线性理论解决生态控制原理。由此看来,现代控制理论在生态控制中的应用,任重而道远。

参 考 文 献

- 于系民等. 1999. 霜期农业气候学. 北京:气象出版社.
- 关肇直文集编辑小组. 1986. 关肇直文集. 北京:科学出版社.
- 宋 健、韩京清. 1962. 线性最速控制系统的分析与综合理论. 数学进展, 5:264~284.
- 张钟俊等. 1984. 控制理论在管理科学中的应用. 长沙:湖南科学技术出版社.
- 陈翰馥. 1978. 关于随机控制. 应用数学学报, 1:175~179.
- 陈翰馥. 1979. 二次性能指标下的随机控制问题. 数学学报, 22:438~447.
- 陈翰馥. 2002. 控制论——人类对万物的驾驭术. 南宁:广西科学技术出版社.
- 裴铁璠等. 2001. 生态动力学. 北京:科学出版社.
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J. and Williams, T. A. 1982. *An Introduction to Management Science*. New York: West Publishing Co. .
- Cooper, W. W. 1997. Survey of mathematical programming in air pollution management. *EURO. Journal of OR*, 96:1~35.
- Fang, F. K. and Sandier, M. 1997. *Complexity and Self-Organization in Social and Economic System*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lin, Y. X. 1994. An ordered independence system and its application to scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 74:183~195.
- Mackenzie, A., Ball, A. S. and Virderr, S. R. 1998. *Instant Notes in Ecology*. New York: BIOS Scientific Publisher Ltd. .
- Курицкий, Б. Я. 1984. *Оптимальное Решение? - Это Очень Важно!* Москва: Машиностроение.

第五章 确定型生态控制模式

我们在第四章论述了控制理论(control theory)在生态控制中的应用问题。那些理论基本上都是确定性模式。在生态控制问题中,尚有许多不能归入控制理论的确定性模式,属随机型生态控制。

确定性生态控制模式,是根据生物与环境关系的分析,经由一定假定条件后,能用理论定量或定性表述的模式,建立模式的过程也就是所说的模造。有了这样的模式,则可在控制实验中,依模式行事,决定策略,使生态控制效果最优。

本章从农田、森林生境、湿地水文、动物与人、闭合系统几个方面说明相关模式。

第一节 农作物及杂草生态控制模式

农田作物及杂草生长都离不开营养生态动力源。本节介绍通过试验并建立模式,了解作物营养需求,再予以补充,是提高生产效率的关键。而对于同作物竞争营养生态动力源的杂草,掌握其分布规律,是使控制合理化的关键。本节扼要论述有关模式及应用。

一、营养等生态动力源要素投入量的最优控制及其经济效果的计算

如《生态动力学》一书第七章第四节所说:“从生态动力学出发,研究动植物营养的生态动力学机制与途径,特别是研究动植物营养的生态动力源调节,则是该学科在此领域中的责无旁贷的任务。”该书也举出一些调节方法,主要是环境调节指标和营养供给问题。细心的读者读后会希望进一步提出调节的定量方法,而这正是生态控制及其经济问题的研究方向之一。本节依据我们亲自试验和计算,试通过实例分析这一问题,并演示具体数学公式的推导与方程求解过程。值得注意的是,这里的控制过程和效果,都是围绕生态经济加以研究的。

1. 植物营养最佳投入及其生态效果问题的提出

我们这里只针对农作物。作物生态产量是各种生态动力源因子综合作用的结果。要提高生态动力源的正的生态动力效应,就必须注意生态效益变化规律,当某类生态动力源因子成为提高生态产量的限制因子时,要通过人为调节该种生态动力源因子,比如投入化肥,并在不断投入的同时,注意其他生态因子的合理性,即合理投入以利增产增收,少投入多产出,提高经济效益。在下面的研究中,按农业生态学的惯例,把投入1个单位的必要资源(或改变1个单位的环境条件)所引起的生态产量的增加(或减少)额叫做边际产量,用 MP 表示。下面,让我们就两种情况,求资源投入水平(或环境调节水平)。

2. 一元生态函数的情形

对于数学关系比较明确的函数表达式,并且其模式比较简单的情形,依据农业经济基本原理,如果我们寻求其取得最高生态产量 y 所需资源投入水平 x ,则只须令边际产量 $MP = dy/dx$,求其解 x^* ,并证明在 x^* 处的 $d^2y/dx^2 < 0$,则 x^* 为取得最高生态产量的资

源投入水平。

如果我们所追求的是最大的生态经济效益,那么只要将利润 TR 方程对 x 求导数,并令

$$\frac{d(TR)}{dx} = 0 \quad (5-1)$$

由此求得

$$\frac{d^2(TR)}{dx^2} < 0 \quad (5-2)$$

条件下的 x^* 就是取得最大利润的资源投入水平。由以上公式,并以 P_y 和 P_x 分别表示产品和资源的单位价格,可以得

$$\frac{P_y dy}{dx} - P_x = 0 \quad (5-3)$$

于是我们有

$$P_y dy = P_x dx \quad (5-4)$$

或

$$\frac{dy}{dx} = \frac{P_x}{P_y} \quad (5-5)$$

式中, dy/dx 即是边际产量 MP , $P_y dy$ 为产值增加量, $P_x dx$ 为成本增加量。

以上的公式(5-3), (5-4)和(5-5)为边际平衡原理的三个表达方式,即:要获得最大利润的最佳资源投入水平,应使边际成本——或者说边际资源——等于产品的单价之比。

(1)植物营养生态动力源的优化控制

现以玉米地 NH_4NO_3 肥施用效果为例,施用 NH_4NO_3 对玉米生态产量所起作用的生产函数是

$$Y_1 = 565 + 2.312X_1 - 0.043X_1^2 \quad (5-6)$$

中等水平土地的相应函数是

$$Y_2 = 395 + 2.298X_2 - 0.024X_2^2 \quad (5-7)$$

现已知 NH_4NO_3 的价格为 $0.35 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 玉米籽粒的单价为 $0.21 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 我们要求的是为取得最高生态产量和最大利润的 NH_4NO_3 施用量。

生态产量最高的 NH_4NO_3 投入量 X_1^* 和 X_2^* 应当满足

$$\frac{dY_1}{dX_1} = 2.312 - 0.086X_1^* = 0 \quad (5-8)$$

和

$$\frac{dY_2}{dX_2} = 2.298 - 0.048X_2^* = 0 \quad (5-9)$$

由式(5-8),我们有

$$\begin{aligned} 0.086X_1^* &= 2.312 \\ X_1^* &= 26.88 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1} \end{aligned}$$

由式(5-9),我们有

$$0.048X_2^* = 2.298 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$X_2^* = 47.88 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

注意到

$$\frac{d^2 Y_1}{d^2 X_1} = -0.086 < 0$$

和

$$\frac{d^2 Y_2}{d^2 X_2} = -0.048 < 0$$

所以,由式(5-6),将 $X_1^* = 26.88$ 代入,我们有

$$Y_1^* = 565 + 2.312 \times 26.88 - 0.043 \times (26.88)^2 = 596.078 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

由式(5-7),将 $X_2^* = 47.88$ 代入,我们有

$$\begin{aligned} Y_2^* &= 395 + 2.298 X_2^* - 0.024 X_2^{*2} \\ &= 395 + 2.298 \times 47.88 - 0.024 \times (47.88)^2 \\ &= 450.008 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1} \end{aligned}$$

由式(5-5)、(5-8)和(5-9)为取得最大纯利润时, NH_4NO_3 投入量 X_{m1}^* 和 X_{m2}^* 应当分别满足:

$$\frac{dY_1}{dX_1} = 2.312 - 0.086 X_{m1}^* = P_X / P_Y = 0.35 / 0.21$$

和

$$\frac{dY_2}{dX_2} = 2.298 - 0.048 X_{m2}^* = P_X / P_Y = 0.35 / 0.21$$

于是,我们求得:

$$X_{m1}^* = 7.50 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$f(X_{m1}^*) = 579.921 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$TR_1^* = 579.921 \times 0.21 - 7.5 \times 0.35 = 119.158 \text{ 元} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

和

$$X_{m2}^* = 13.15 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$f(X_{m2}^*) = 421.05 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$TR_2^* = 421.05 \times 0.21 - 7.5 \times 0.35 = 85.795 \text{ 元} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

(2) 动物营养生态动力源的优化控制

裴铁璠等(见《生态动力学》p66)曾经指出:“试验结果向我们提出如下问题:应如何调节人工生态动力源,才能有益于仔猪的生长发育?才能取得最佳营养效果?这是一个待研究的重要方向。在有条件的时候……用更新的数学方法加以分析综合”。根据上述建议,我们以下例就新的控制方法应如何用于动物问题加以说明。设某种动物,在最适宜生态环境(以温度、湿度、光照、风等条件综合评定)下,优质饲料摄入量对该种动物生态重量的函数为

$$Y_1 = 572 + 2.114 X_1 - 0.034 X_1^2 \quad (5-10)$$

而中等适宜生态环境下,优质饲料摄入量对该种动物生态重量的函数为

$$Y_2 = 410 + 2.248 X_2 - 0.022 X_2^2 \quad (5-11)$$

已知饲料单价为 $0.29 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 该种动物生态体重的单价为 $0.24 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

下面的问题是求该种动物的最高生态重量和最大利润所对应的优质饲料投入量。生态增重量最高所相应的饲料投入量 X_1^* 和 X_2^* , 并有

$$\frac{dY_1}{dX_1} = 2.114 - 0.068X_1^* = 0$$

和

$$\frac{dY_2}{dX_2} = 2.248 - 0.044X_2^* = 0$$

求解得

$$X_1^* = 31.09 \text{ kg} \cdot \text{只}^{-1}$$

$$X_2^* = 51.09 \text{ kg} \cdot \text{只}^{-1}$$

并且有二阶导数

$$\frac{d^2 Y_1}{d^2 X_1} = -0.068 < 0$$

$$\frac{d^2 Y_2}{d^2 X_2} = -0.044 < 0$$

所以, 在 X_1^* 和 X_2^* 的投入水平下, 该种动物将形成的最高生态重量可作如下计算:

将 $X_1^* = 31.09$ 代入式(5-10), 我们有:

$$Y_1 = 572 + 2.114 \times 31.09 - 0.034 \times 31.09^2 = 604.86 \text{ kg} \cdot \text{只}^{-1}$$

将 $X_2^* = 51.09$ 代入式(5-11), 我们有:

$$Y_2 = 410 + 2.248 \times 51.09 - 0.022 \times 51.09^2 = 467.43 \text{ kg} \cdot \text{只}^{-1}$$

求最大纯利润时, 饲料投入量 X_{m1}^* 和 X_{m2}^* 应当分别满足

$$\frac{dY_1}{dX_1} = 2.114 - 0.068X_{m1}^* = P_X/P_Y = 0.29/0.24$$

和

$$\frac{dY_2}{dX_2} = 2.248 - 0.044X_{m2}^* = P_X/P_Y = 0.29/0.24$$

于是, 我们求得

$$X_{m1}^* = 13.29$$

$$f(X_{m1}^*) = 594.1$$

$$TR^* = 594.1 \times 0.24 - 13.9 \times 0.29 = 138.55 \text{ 元} \cdot \text{只}^{-1}$$

和

$$X_{m2}^* = 23.59$$

$$f(X_{m2}^*) = 450.79$$

$$TR^* = 450.79 \times 0.24 - 23.59 \times 0.29 = 101.35 \text{ 元} \cdot \text{只}^{-1}$$

3. 多元生态函数的情形

在多种可变生态动力源因素投入下, 其生产函数为

$$Y = F(X)$$

这里

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$$

则取得最高产量的必要条件为

$$\Delta f(X^*) = \left[\frac{\partial f(X^*)}{\partial X_1} \quad \frac{\partial f(X^*)}{\partial X_1} \dots \frac{\partial f(X^*)}{\partial X_1} \right] = 0$$

且在 X^* 处的 HESSE 矩阵 $H(X^*)$ 的各阶主子式恒有正负相间, 即有

$$H(X^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_1^2} & \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_1 \partial X_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_1 \partial X_n} \\ \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_2 \partial X_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_n \partial X_1} & \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_n \partial X_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_n^2} \end{bmatrix}$$

那么, 生物在各种生态动力源因素投入量 $X^* = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)^T$ 条件下, 取得最高生态产量 $F(X^*)$ 。

同样, 在多种可变投入条件下, 要求其最大利润的投入水平, 应满足

$$\left(\frac{\partial(TR)}{\partial X_1}, \frac{\partial(TR)}{\partial X_2}, \dots, \frac{\partial(TR)}{\partial X_2} \right)^2 = 0$$

求得 $X^* = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_m^*)^T$, 且利润函数在 X^* 处的 HESSE 矩阵负定, 则 X^* 就为取得最高利润 TR^* 时的各要素最佳投入量。

由上式可得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial(TR)}{\partial X_1} = P_Y & \frac{f(X)}{\partial X_1} - P_{X_1} = 0 \\ \frac{\partial(TR)}{\partial X_2} = P_Y & \frac{f(X)}{\partial X_2} - P_{X_2} = 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial(TR)}{\partial X_n} = P_Y & \frac{f(X)}{\partial X_n} - P_{X_n} = 0 \end{bmatrix}$$

则有

$$\begin{bmatrix} P_Y & \frac{\partial f(X)}{\partial X_1} = P_{X_1} \\ P_Y & \frac{\partial f(X)}{\partial X_2} = P_{X_2} \\ \vdots & \vdots \\ P_Y & \frac{\partial f(X)}{\partial X_n} = P_{X_n} \end{bmatrix}$$

或者简写为

$$\Delta F(X) = MP_i = \frac{P_{X_i}}{P_Y}$$

所以多种变动的生态动力源要素的最佳投入量应当使各种生态动力源要素的边际生态产量等于各自要素的比价, 或者说各要素的边际生态产量应当等于各要素单价与产品单价之比。

下面, 让我们举一例加以说明。

某种植物施用氮肥(X_1)和磷肥(X_2)的生产函数是

$$Y = 467.38 + 2.53X_1 - 0.065X_1^2 + 0.82X_2 - 0.01X_2^2 + 0.025X_1X_2$$

让我们令

$$\Delta f(X) = 0$$

则有

$$\begin{cases} \frac{\partial f(X)}{\partial X_1} = 2.53 - 0.130X_1 + 0.025X_2 = 0 \\ \frac{\partial f(X)}{\partial X_2} = 0.82 - 0.02X_2 + 0.025X_1 = 0 \end{cases}$$

解以上方程组,我们得出

$$X_1^* = 36$$

和

$$X_2^* = 86$$

即有

$$X = (X_1^*, X_2^*)^T = (36, 86)^T$$

并有如下的导数:

$$\frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_1^2} = -0.130$$

$$\frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_2^2} = -0.020$$

$$\frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_2 \partial X_1} = -0.025$$

$$\frac{\partial^2 f(X^*)}{\partial X_1 \partial X_2} = -0.025$$

于是,我们有如下矩阵:

$$H(X^*) = \begin{bmatrix} -0.130 & 0.025 \\ 0.025 & -0.020 \end{bmatrix}$$

$H(X^*)$ 负定,说明在氮肥和磷肥施用量分别为 $36\text{kg} \cdot (0.0667\text{hm}^2)^{-1}$ 和 $86\text{kg} \cdot (0.0667\text{hm}^2)^{-1}$ 的条件下,该植物将获得最高生态产量。

$$Y = F(X^*)$$

$$\begin{aligned} &= 467.38 + 2.53 \times 36 - 0.065 \times 36^2 + 0.82 \times 86 - 0.01 \times 86^2 + 0.025 \times 36 \times 86 \\ &= 548.1 \text{ kg} \cdot (0.0667\text{hm}^2)^{-1} \end{aligned}$$

在以上计算结果的基础上,并假定该种植物产品的价格为 $0.26 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,氮肥的单价为 $0.32 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,磷肥的单价为 $0.12 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,下面,让我们求能取得最高纯利润的投入水平。

首先建立方程

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = 2.53 - 0.130X_1 + 0.025X_2 = P_{X_1}/P_Y = 0.32/0.26 = 1.23$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0.82 - 0.02X_2 + 0.025X_1 = P_{X_2}/P_Y = 0.12/0.26 = 0.46$$

即有如下的代数方程组:

$$\begin{cases} 0.13X_1 - 0.025X_2 = 1.3 \\ 0.025X_1 - 0.02X_2 = -0.36 \end{cases}$$

解以上方程组得

$$X_1^* = 17.72 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$X_2^* = 40.15 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$$

$$\begin{aligned} Y^* &= 467.38 + 2.53 \times 17.72 - 0.065 \times 17.72^2 + 0.82 \times 40.15 \\ &\quad - 0.01 \times 40.15^2 + 0.025 \times 17.72 \times 40.15 \\ &= 526.39 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TR^* &= 526.39 \times 0.26 - 17.72 \times 0.32 - 40.15 \times 0.12 \\ &= 126.32 \text{ 元} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1} \end{aligned}$$

即当投入 $17.72 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$ 氮肥和 $40.15 \text{ kg} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$ 磷肥的条件下, 获得最大的生态经济收益为 $126.32 \text{ 元} \cdot (0.0667 \text{ hm}^2)^{-1}$ 。

从以上的原理和计算实例, 我们可以看出, 在一定的简化假定条件下, 营养生态动力源要素的最优调节即最优投入量, 可以用确定性的微分公式加以表达, 并通过求微商, 进一步简化为简单的代数方程。有了这样的确定性的数学模型, 只要数据资料允许, 无论数字多大, 涉及到的生态动力源种类如何多, 原则上都是可以计算求解的。事实上, 生态产量, 无论是植物的、动物的或者是微生物的, 其形成都是由相当多的生态动力源要素相互作用综合而促成的。比如, 陈锡康曾将农作物产量形成估算为 28 个因素。其中, 应当有许多因素是生态因素。有了普遍的公式, 可以制成软件, 计算起来就很容易。所以, 这种生态控制手段有数学依据并且有机理基础。今后进一步改进, 应用前景可观。

但我们必须看到, 一些基础方程的建立, 须有客观数据, 而建立得如何, 是否客观, 首先在于对有关要素的生态意义的理解, 这就看针对具体生物, 依其多方面特性, 比如针对土壤、肥料、气象等条件的需求指标。在此过程中, 第二章所涉及的基础都是很有用的, 比如生物的生理基础、种质的生态适应性等。于是, 要做得客观, 就限于数学这一个方面的基础了。

二、杂草 *Portulaca oleracea* L. 叶空间分布最优化

下面, 我们研究杂草叶空间分布最优化问题。

1. 参数估计

在进行参数估计之前, 应当对异速生长的假定加以评价, 其方法是考察每个占领面积(occupied area)上的叶密度与按对数标尺的植物宽度之间的线性关系。然而, 由植物周围的圆柱的直径所确定的植物宽度是不易测量的, 因为植物的实际边缘显现出某种不规则的型式。因此, 为评价该假定的可靠性, 我们用 $2\sqrt{100Q/\pi}$ 来估计植物宽度 L , 用 $100Q$ 估计占领面积, 这里 Q 系所占领的样方数。这样, 我们就可以对照对数标尺的植物宽度画出每个占领面积的叶密度。绘出的图(图略)指出二者线性关系的存在。

于是可通过线性关系图看到斜率 $p = 0.819$ 。但这样的关系有可能失真。为进行定量分析, 我们应当作另一种估计。在模式假定下, 关于叶的空间分布, 只有一种线性关系, 每个样方内的叶数的平均值、方差之间的权重关系。

这种权重关系的导出步骤如下: 考虑含 k 个象限的一个足够大的空间, 每个 $l \text{ cm} \times l$

cm。将叶数作为连续变量处理。为方便起见,又假定,植物先沿水平方向伸展,其伸展率为 h ;再沿垂直方向伸展,其伸展率为 v 。这里, h, v 和叶的密度是相互独立的。令文字右上方有一撇的符号指示在水平方向伸展后所得的数值,有两撇的符号指示在垂直方向伸展后所得的数值。令 $f(x, y)$ 是空间正交坐标 (x, y) 上叶的密度。这样,在第 i 个象限中叶数 z_i 由下式给出:

$$z_i = \iint_i f(x, y) dx dy \quad (5-12)$$

这里,二重积分代表在第 i 个象限内部的累积。由方程(5-12)可得

$$\begin{aligned} \iint_i [f(x, y)]^2 dx dy &= \iint_i \left[f(x, y) - \frac{z_i}{l^2} + \frac{z_i}{l^2} \right]^2 dx dy \\ &= \iint_i \left[f(x, y) - \frac{z_i}{l^2} \right]^2 dx dy + \frac{z_i^2}{l^2} \end{aligned} \quad (5-13)$$

让我们用 E 表示数学期望,用 V 表示方差。由方程(5-13),我们可以将 z_i 平方的数学期望表示为

$$\begin{aligned} E(z_i^2) &= \frac{1}{k} E\left(\sum_{i=1}^k z_i^2\right) \\ &= \frac{l^2}{k} E\left\{\sum_{i=1}^k \iint_i [f(x, y)]^2 dx dy\right\} - \frac{l^2}{k} E\left\{\sum_{i=1}^k \iint_i \left[f(x, y) - \frac{z_i}{l^2}\right]^2 dx dy\right\} \end{aligned} \quad (5-14)$$

方程(5-14)右边的第一项和第二项是总方差和样方内的方差。在水平伸展之后,总方差比原来大 h^2 倍,因此,所占领的面积成为其前数值的 h^2 倍;而样方内部的方差增加得很小,这是因为沿着距植物中心点的距离的叶密度之平均坡度成为前一数值的 $1/h$ 倍。因此,我们得到如下的渐近关系:

$$E(z_i'^2) \approx E(h^2)E(z_i^2)$$

当水平方向伸展和垂直方向伸展都是完全伸展的时候, z_i 的方差就成为

$$\begin{aligned} \sigma'^2 &= V(z_i') [E(v)]^2 + V(v) [E(z_i')]^2 + V(v) V(z_i') \\ &= \{E(z_i'^2) - [E(z_i')]^2\} [E(v)]^2 + \{E(v^2) - [E(v)]^2\} E(z_i'^2) \end{aligned} \quad (5-15)$$

因为 v 和 z_i 是相互独立的。如果 $E(z_i'^2)$ 比 $[E(z_i)]^2$ 大得多,将方程(5-14)代入方程(5-15),我们得到如下关系:

$$\sigma'^2 \approx E(h^2)E(v^2)E(z_i^2) - [E(h^2)]^2[E(v)]^2[E(z_i)]^2 \approx E(h^2)E(v^2)\sigma^2 \quad (5-16)$$

同样,每个样方平均叶数就比原来大 $h^2 v$ 倍。由于 h 和 v 是互相独立的,我们有

$$\mu'' = E(h^2 v \mu) = E(h^2)E(v)\mu$$

因此,按对数标尺的方差相对变化由下式给出:

$$\frac{\lg(\sigma'^2) - \lg(\sigma^2)}{\lg(\mu'') - \lg(\mu)} \approx \frac{\lg[E(h^2)] + \lg[E(v^2)]}{\lg[E(h^2)] + \lg[E(v)]} \quad (5-17)$$

不论 μ 为何值,该等式都是不变的,因此,我们有权重关系

$$\lg(\sigma^2) = \lg(a) + b \lg(\mu)$$

这就是说,我们有

$$\sigma^2 = a\mu^b$$

式中, b 相当于等式(5-17)。方程(5-17)还有类似的形式(Yamamura, 1990)

$$b = \frac{2\lg(h) + 2\lg(v)}{2\lg(h) + \lg(v)} \quad (5-18)$$

并可写成如下形式:

$$p = \frac{\lg(v)}{\lg(h)} = \frac{2(b-1)}{2-b} \quad (5-19)$$

将 b 的估计值代入方程(5-19), 我们能够估计相对伸展率 p 。模拟结果可绘成图了。

据以上推导, Yamamura(1997)给出每个象限叶数之平均值与方差之间的权重关系

$$\sigma^2 = a\mu^b \quad (5-20)$$

这里 μ 是平均值, σ^2 是方差。量 a 和 b 都是常数。这个关系式按对数标尺用线性形式表达为: $\lg(\sigma^2) = \lg(a) + b\lg\mu$ 。经过推导和数字运算, 得出 $p = 0.797$, $v = h^{0.797}$ 。对于常定的叶尺寸, p 也服从 LAI 和植物宽度之间的幂函数关系, 即 $[AIO(\text{植物宽度})^{0.797}]$ 。

用 A 表示叶的总面积(单位: cm^2), 用 W_L 表示叶的干重(单位: g), 用 W_R 表示根的干重(单位: g), 用 W_S 表示茎的干重。*P. oleracea* 的这些变量之间的异速增长关系可以绘图说明。所得结果作为模拟的基础。

2. 为求最优值的模拟

为确定用于模拟的初始叶数, 我们首先进行初步模拟, 每次模拟都是从一棵植株开始的, 该植株位于由 $121 (= 11 \times 11)$ 个样方(每个 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$)组成的一个正方形的中心。初始植株宽度被令为 10cm 。为了计算水平伸展, 用步长 $v = 1.2^{0.797} = 1.156$, 这是依 $p = 0.797$ 这一关系得到的。经过推导, 得出叶总数 N 与植株宽度 L 之间的关系式是:

$$\lg N = -1.320 + 2.797\lg L \quad (5-21)$$

并有

$$\lg W_S = -6.019 + 4.010\lg L \quad (5-22)$$

为了用初步模拟所确定的初始条件来寻找最优植株宽度, 再进一步作模拟。草所在圆柱体的伸展规律与初步模拟相似, 只是步长较短。在每一步模拟过程中, 每个样方中的圆柱的体积都是用数值积分计算出来的, 并且根据推导出来的有关方程, 计算出植株的总干重。叶所覆盖的总面积和叶面积指数也是用公式计算出来的。对 p 的各个数值, 作重复模拟。

叶所覆盖的地面面积指示光合作用能力, 因此, 对于给定的干物质重量来说, 具有最大覆盖面积的植株, 能够解释为具有最有效的植株形式。这样, 可以在二维直角坐标系上绘出横坐标为植株总重量 W_T 、纵坐标为叶覆盖面积的曲线。从图上可看出 p 的最优值约为 1.4。参数的实际值($p = 0.797$)不是精确的最优值; 所覆盖的面积大约是 $p = 1.4$ 所覆盖面积的 85%。无论是实际 LAI 或者是最优 LAI 都随着植株宽度的增加而增加。

植株叶的实际情况的空间分布是不能用圆柱形作精确描述的。在某些情形下, 近植株中心点处, 叶的密度比边缘部位稍小些, 形成一种炸面饼圈形的分布。在另一些情形下, 近植株边缘处的叶密度略小于中心部位。而且, 植株边缘形状, 并非为正圆形, 植株边缘有些像菱形(Novoplansky *et al.*, 1990)。因此, 应当考察对植株形状的敏感性。但考察结果指出: 这种形状影响不是很大的。

伸展较快的植株, 在植株常遭受破坏的变化着的环境中, 是有其优势的。因此, 有必要研究时间 t 和覆盖面积 G 之间的关系。因为植株生长与光合作用能力有密切关系, 所

以给予必要的假定条件,干重的瞬时增加率与在给定时间叶覆盖面积成正比

$$\frac{dW_T}{dt} = c g(W_T) \quad (5-23)$$

式中, c 是常数, $g(W_T)$ 是用函数表达的覆盖面积。伸展达到给定总重量所需时间是用如下的数值积分计算的:

$$t = \int \frac{1}{g(W_T)} dW_T \quad (5-24)$$

经计算, p 的最优值——给出在任一给定时间最大覆盖面积的值——大约是 1.4。参数最优随时间有微小的变化。在早期发育阶段,沿垂直方向伸展较多的植株能够覆盖较大的面积,而在后期发育阶段,沿水平方向伸展较多的植株能够覆盖较大的面积。这种早、晚期不同作用的原因大概是:在植物生长的初期,叶面积指数很低,所以此时叶面积指数的增加而导致的自身遮阴作用是很弱的。这样,如果一植株,在其伸展期间内,不受异速增长限制,而“灵活地”改变 p 值,那么该植株就会更有效地截取太阳光并且生长得更快。参数的这样一种最优变化,可以用最优控制理论进行计算,比如用 Понтрягин 的最大值原理和动态规划方法,如 Iwasa 和 Rough Garden(1984)以及 Iwasa 和 Cohen (1986)指出的那样。

第二节 树木生态控制的最优策略

树木生育和树种优选的最优控制是保障树木充分利用生态动力源的有利因子的最优策略。其中用确定性数学模拟方法作推导和计算,是近年发展起来的新方法。

下面从两个方面介绍,最后用泛函分析处理森林演替问题。

一、树木根分布最优策略:遗传算法模拟

在森林树木的生长发育中,水文生态动力因素是十分重要的。裴铁璠等(生态动力学,2001)在近年研究了多项关于森林水文功能课题,诸如,森林生态系统水文功能模拟实验研究、森林水文过程及流域水资源调控机理、西部典型区域森林植被对农业生态环境的调整机理、森林流域暴雨径流模型研究、森林流域暴雨洪水预警指标体系研究、森林流域坡地壤中流模拟与模型和森林蒸散模型与模拟研究等。森林作为生物性质的生态动力源发挥其特有功能的同时,也是一种生态动力汇,直接或间接地受益或受害于地貌、水文、气象、土壤以及某些生物,作为森林中树木的各种生态动力因子,它们之间一般总是相互联系着的。而树木以根从土壤中吸收水分,乃是以水文为主的生态动力源因子对树木这种植物起作用的最重要的方面,也应是森林水文研究中的一项重要课题。

但是,在以往关于树根吸水的研究,往往以定性为主。这样要使一定期间(比如 10a)的水分被树木吸收的廓线,被正确地认识是很难的。但是在计算技术不发达的时代,由于许多关系的非线性特征,以及涉及的参数太多,以致人们对此几乎无能为力。近年,非线性数学研究的发展和遗传算法(genetic algorithms)的出现,为森林水文生态优化控制,提供了使用它的良好契机。加上专门的实验材料,van Wijk 等在这方面作了一项开拓性工作。这是用最优化理论深入了解树木根的廓线与水文关系的第一步成果。下面我们简单介绍,并展望其在森林水文生态控制中的意义。

1. 模造过程

van Wijk 在研究树木根的廓线时,模拟了根分布的森林水文的最优策略。所谓根的最优分布,系指在 10a 期间能最多从土壤中吸收水分的根的分布。

van Wijk 根据在荷兰四个林地的试验资料,提出了 SWIF 模式(有林生态系统中土壤水分模式),该模式描述土壤水分未饱和和区内水分的垂直分布和根吸收水分的规律。该模式也涉及饱和区中土壤蒸发和排水潜势。

SWIF 模式用有限差分求解 Richards 方程

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + 1] - S(h, z) \quad (5-25)$$

式中, C 是微分持水量(单位: m^{-1}), t 是时间(单位: d), z 是高度(单位: m), h 是土壤水头压力(单位: m), $K(h)$ 是未饱和水力传导度(单位: $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$), S 是按根吸水(d^{-1})计算的汇项。

根自第 i 层吸水 S_i 是该层的一个减函数 $f(h_i)$, 有关系式

$$S_i = f(h_i) S_i^* \quad (5-26)$$

并有

$$f(h) = 0 \quad h \leq h_1 \quad (5-27)$$

$$f(h) = 1 - \left[\frac{h - h_2}{h_1 - h_2} \right]^a \quad h_1 < h < h_2 \quad (5-28)$$

$$f(h) = 1 \quad h_2 \leq h \leq h_3 \quad (5-29)$$

$$f(h) = 1 - \left[\frac{h_3 - h}{h_3 - h_4} \right] \quad h_3 < h < h_4 \quad (5-30)$$

$$f(h) = 0 \quad h > h_4 \quad (5-31)$$

式中, 经验参数 a_1 、萎蔫点 h_1 (m)、水分胁迫减小点 h_2 (m)、湿轨迹最优转换开始点 h_3 (m) 和厌氧生活点都是校准的参数。

自某一层的吸收潜势, 是按被表达为土壤廓线的根有效总长度 $\sum(\theta_i R_i)$ 的一层 ($\theta_i R_i$) 的根的有效长度的饱和部分(真分数), 由总的可能蒸腾 T^* ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) 的分布计算出来的

$$S_i^* = T^* \frac{\theta_i R_i}{\sum(\theta_i R_i)} \quad (5-32)$$

式中, 饱和部分 $\theta_i = \theta_i / \theta_{s,i}$, 而 q_i 和 $q_{s,i}$ 分别指示第 i 层的实际水含量和饱和水含量; R_i 是第 i 层根的密度, 可能蒸腾 T^* 用下式计算

$$T^* = f_c (1 - G) ET^* - (1 - f_{\text{thf}}) / f_i \quad (5-33)$$

式中, f_c 代表标准特征的经验作物因子; G 是冠层透光率(真分数); f_i 是截阻效率; ET^* ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) 是由每日总辐射和温度计算得出的可能蒸散; f_{thf} 是穿透降雨率 (throughfall fraction), 以日降水量被输入到模式中。

2. 一些问题的处理

本研究的目标是确定 SWIF 模式中每一层中根密度的最优值。由于传统的最优化方法, 不适应参数很多的优化计算, 在这个优化中, 须用遗传算法 (Gallagher *et al.*, 1994)。遗传算法是处理大尺度非线性最优化问题的一种有效的数学工具。遗传算法是

由自然进化过程引发的最优化研究方法。遗传算法的主要思想是用自然进化方法的基础组分——作为遗传(DNA)数据结构的组织编码、重组、突变以及一些有意义特性的持续性。每一个参数都被表达为一个基因。代表一个参数组合的基因形成一个染色体。在该模式中,有 14 个参数、一个染色体含 14 个基因,具体算法类似于 van Wijk 和 Bouten (2000)的方法。本计算最优化长度选为 200 代,因为在此后,所计算的水的吸收量没有显现出任何改进的特征。

对于树木根的相互作用,Wijk 用两种不同的模式构型作了检验,那就是单株的根的廓线用于其中的标准模式构型(SWIF-NC);两株根为同样可用水分进行竞争的模式构型(SWIF-C)。对于根的廓线,系用遗传算法作参数化处理的。在一定条件下,根廓线的拟合度,被定义为 10a 模拟期间的持水量。SWIF-C 的根廓线是用进化博弈(evolutionary game)作最优化处理的。结果表明,在各个地块之间,根的最优分布有明显差异;两个模式的构型之间,根的最优分布也有明显差异。SWIF-C 的最优化结果,给出容易用合理的生物学策略表示根的廓线。在较湿的土壤区,树木吸水有优越条件,这种特征对于表达根的模拟分布来说,是一个重要因素。作为最优化处理而得到的根的廓线,与实测廓线,仍有一定差异。对这种差异的解释,尚不太令人满意。但是,Wijk 等的工作是用最优化处理理论深入了解树根分布廓线同水文生态动力源关系的第一步。

有了树根的分佈与土壤水分关系的最优化研究成果,则可在 10a 的周期内对于土壤水分作必要的调节与控制,以有利于森林和各种林地树木的生长发育,促进森林更新的最优化。

二、混交林树种协调的生态控制模式:Lotka-Volterra 方程的应用

造林选种历来是生态控制的重要手段,就大范围来说,生态工作者往往是通过生态考察来了解欲造林区的气候、土壤、水文等立地条件,看其适宜种什么树种的树木,这事实上是从非生物性质的生态动力源出发来决策树种选择的方法。并据此决策各树种控制面积、控制区域等。如果某两种以致两种以上的数种树木,多年来在某一个地区生长发育得很好,说明该地区对这些树种都适宜。此种情形下,种群数量变化受生物性质的生态因子的影响,则大于受气候因素的影响。吴承祯等(2001)研究了柳杉-杉木人工混交林种间竞争关系。这两种树种所组成的人工共优群落中,资源竞争用 Lotka-Volterra 模型表示为

$$\frac{dN_i}{dt} = r_i N_i \left(1 - \frac{N_i + a_{ij} N_j}{K_i} \right) \quad (i \neq j) \quad (5-34)$$

式中, $i, j = 1, 2, \dots, n (i \neq j)$ 表示生长在一起的几个物种; K_i 表示种 i 的环境容纳量(经吴承祯等研究,柳杉和杉木的值分别为 216 和 180); r_i 为种 i 的内禀增长率; a_{ij} 表示种 j 对种 i 的竞争系数; N_i, N_j 分别表示种 i 和 j 的蓄积量。混交树种竞争系数

$$a_{ij} = a_{ji} = \frac{\sum_{l=1}^n (P_{il} P_{jl})}{\left(\sum_{l=1}^n P_{il}^2 \sum_{l=1}^n P_{jl}^2 \right)^{1/2}} \quad (5-35)$$

式中, P_{il} 和 P_{jl} 分别为树种 i 和树种 j 在第 l 个林分中的相对优势度。经计算,混交树种的各龄组的竞争系数是:幼龄林, 0.9543; 中龄林, 0.7079; 近熟林, 0.8685; 全部样地, 0.7044。

依假定和推定条件,将有关数字代入方程(5-34),得

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1 + 0.7044 N_2}{216}\right) \\ \frac{dN_2}{dt} &= r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2 + 0.7044 N_1}{180}\right)\end{aligned}$$

式中, N_1, N_2 分别为柳杉、杉木蓄积量。在自然状态下, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\frac{dN_i}{dt} = 0$$

即达到平衡状态时, 应有

$$\begin{cases} N_1 + 0.7044 N_2 = 216 \\ N_2 + 0.7044 N_1 = 180 \end{cases}$$

解此方程得 $N_1 = 177.06 (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$, $N_2 = 55.28 (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$, 于是 $N_1 + N_2 = 232.34 (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$, 计算结果表明, 两树种混交林蓄积量大于任一 K_i 值, 说明这一人工混交群落, 由于生态位叠加, 更能充分利用当地有益的生态动力源。指出柳杉—杉木混交, 可行性的理论依据充分, 且有利于提高人工林生态系统生产力。

用确定性方程结合具体生物种来选择树种的过程, 实际上是一个生态控制最优化过程用于人工群落的一种很好的实践。如果说, 人们设法优化控制自然植物群落是非常困难的, 以致很难想像有成功的可能, 而对自然群落的生态控制, 则用 Lotka - Volterra 方程, 结合具体对象, 则是可行的。吴承祯等的研究, 是一个典型的应用范例, 值得推广。用于涉及竞争问题的植物种的生态控制, 不限于混交林, 其实像农田作物套作、混作等也是可行的。当然, 我们并不否认, 在这样的工作中, 尤其是对方程作合理假设, 以致在典型数字的选取过程中, 难免存在一些主观成分, 但这并不影响方法的进一步应用。如果要求绝对准确, 那是不可能的。

三、应用泛函分析的森林演替模型

泛函分析(functional analysis)是分析数学中的重要组成部分, 当然也是基础数学的重要组成部分。在地球科学中应用, 丑纪范院士早在 1962 年就用之于气象学。在生物学中, 近年来应用也渐多起来。

关于非线性森林演替系统(nonlinear forest evolution system), 可用如下抽象形式方程来表示

$$\begin{cases} \frac{dp(t)}{dt} = Ap(t) - K(t)f(N(t))p(t) \\ p(0) = p_0 \end{cases}$$

式中, $p(t)$ 是时刻 t 林木的分布密度, $N(t)$ 是时刻 t 林木总量, $K(t)$ 为时刻 t 的环境影响系数, 并有 $K(t) > 0$, $f(N(t))$ 是环境阻尼函数, 即环境影响函数, A 是 Hilbert 空间中的定义算子。

这个非线性的森林演替系统能比较客观地反映演替规律, 在 f 为一般连续可微的情形下, 上述方程解具有渐近稳定性。林木的增长与演替受各种自然生态动力源的制约, 也受人类活动生态动力源的影响, 生态系统是森林赖以生存的物质基础, 用泛函分析寻求系统稳定性的规律, 依此规律再用控制论方法优化控制生态系统, 是森林可持续发展

的生态控制的理论基础。

泛函分析生态应用的另一个领域是考虑非自治的具有阶段性的结构的种群扩散和收获的时滞生态模型。运用泛函分析微分方程的单调流理论和凹算子理论,得到惟一正周期解的存在性和全局渐近稳定性的结果。并得到收获阈值。该结论说明,只要收获量不超过其阈值,通过扩散,种群则可保持持续生存,而且会稳定在一个周期振荡的水平上。该研究对合理利用生物资源,维持生物多样性,有理论上的指导意义。

第三节 湿地管理及水文生态控制

涉及水文生态动力管理是使农田、湿地、河流、湖泊、海洋水质保持优化的重要措施。随着排污水平的提高,实现水质优化成为生态控制的重要课题。既保障各种污染物合理排放,又保障水质优化,是这方面数学模造的初衷。下面针对几个具体问题分别说明。

一、湿地生态系统管理定性模造

为遥远的湿地系统创造一个长期管理规程,这是对研究者的一个挑战,这项工作需要具有计划专家眼光的研究技艺。

遥远湿地数据奇缺,专门试验又极其困难,以致迄今难于作定量模造,而定性数据的高等数学模造方法,可使研究者能够依据有限的野外试验和生态学的基本原理,在一定程度上揭示出湿地动态特征。依据所得规律,则可了解管理活动与生态系统人工影响的关系,为这类生态系统的优化控制,提供可行的手段。

定性模式用其方式变量之间的反馈表示关于某一单变量的一个参数变化与对其他系统变量的影响之间的相互关系。这种关系一旦被分辨出来,任何可能的间接的负效应,都可以包括在整个管理策略和重要的监测努力之中。下面简述其原理和案例。

1. 图模式

这里所用的圈模式(图 5-1)是 Puccia 与 Ievins 提出的。该模式的结构用图形表示。大圆圈确定模式变量,表示它们的实际生物量或丰度(比如说表示营养的浓度)。所画出的两变量间的连线说明它们之间的营养关系。从一个变量(S_1)出发、终止于另一个变量(S_2)的箭头,指示后者从前者得到某种“利益”。图中有三个小圈,其中每个小圈内都有一横线。与一个小圈相连的直线指示相反的情形:一个变量(S_2)对另一个变量(S_1)的生长(或丰度)产生负作用。捕食者—食饵系统的情形是用涉及两个符号的连线连接着的两个变量描述的(图 5-1a)。

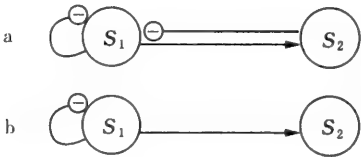


图 5-1 用于圈分析的符号和两属性(S_1 和 S_2)间的相互关系

在图 5-1a 中,自身封闭连线(S_1 上)也表示为一个涉及变量自身的小圆圈。自身效应关系到对具体属性的生长或密度有影响的依赖于密度的现象。此外,如果一种属性,由于受模式中无法表述的某一其他要素的作用,而对其自身生长起作用的话,那么自身

封闭环就是必要的。营养网的低水平,通常依赖于在模式中表达不出来的其他物质,因此必然是自身封闭的。

图 5-1b 表示另一种类型的相互关系,这种关系通常出现在含有生物和非生物变量的生态模式之中。

一个稳定的生态系统,将由负反馈占主导地位。如果已知稳定系统的一个模式表现出不稳定性,那么为表达该模式而选择的相互关系就应被重新评价,为描述该系统,有必要作进一步分析,并研制更好的模式。

当图形结构被最终确定下来的时候,则要通过分析来确定:每个单个变量的修正对模式中一切变量平衡的影响。这项工作的第一步是:确定从每一个变量到修正过的变量的反馈路径。在两个变量之间,通常有多个路径,修正一个变量,对另一个变量可能有负反馈作用,也可能有正反馈作用。一个变量的变化对另一个变量的平衡值有影响,为确定这种影响,我们必需考虑这两个变量之间的一切可能的路径,并同时考虑不含这两个变量的补充路径和整个系统的总反馈。变量 X_i 的某种变化所引起的变量 X_j 的某一平衡值的变化,这种变化用如下方程计算:

$$\frac{\partial X_j^*}{\partial c} = \frac{\sum_i \left[\frac{\partial X_i}{\partial c} \right] (P_{i,j}) (F^{\text{comp}})}{F_n}$$

这里,变化中的变量是 dX_i/dc ,从 X_i 到 X_j 的每个可能路径是 $P_{i,j}$,每个 $P_{i,j}$ 的补足路径是 F^{comp} 。整个系统的总反馈是 F_n 。由于从 X_i 到 X_j 可能有很多路径,所以,通向 F^{comp} 也有许多补足路径。决定总效应的是每个路径效应的和。对于每个可能路径来说, dX_i/dc , $P_{i,j}$ 和 F^{comp} 决定关于 X_j 的总效应。

对于有 n 个变量的任何一个圈模式来说,一个参数变化的通路,都有 n 个点,每个变量有一个点。可以构造一个预报表,从而指出,每个变量将会怎样响应其自身或其他任何变量的变化而变化。

2. 具体应用

浅湖和湿地是十分复杂的生态系统,在这样的系统中,影响一个单个组分的行动可能有远离目标参数的响应,这直接关系到其中的生物物种。在对湿地所作的大尺度研究中,研究者已经构造了一组定性模式,其目的是进一步了解管理行动及其对主要非生物、生物的生态系统变量影响之间的关系。关于“人工影响湿地的生物、非生物特性的过去和未来”这类问题,已建立了两个定性的模式。第一个模式研究对大鳄鱼禁捕令的作用。第二个模式研究区域经济发展对湿地水质、生物多样性的潜在影响。两个模式的输出结果表明:特殊种群(食鱼类水禽)和部分组分(浅水大型植物)对生态系统中潜在的人为作用,是更敏感的。这是将管理、资源利用实践的作用输送到这些部分组分中的一系列反馈机制所引发的结果。

3. 讨论

湿地的利用向来为生态学家所重视,近 10 多年来,由于建设和旅游资源开发的需求,也被列入政府的议事内容之中。但鉴于湿地科学数据很少,研究者往往限于描述,或用无高等数学的定性分析,故无法提出正确决策建议。在我国,尤其是这样。其实,从农业、旅游、水处理等方面来说,人们都不只要求一般的关于湿地的描述性报告,而需要正确决策性建议,这就需要有湿地的坚实的科学基础研究成果,并有长期的全面的监

测方法。关键参数的正确选择,对于合理的监测程序的构建,是很重要的。在这样的一种努力中,利用收集到的器测资料来了解湿地变量之间的相互关系,定性模造则是一种有益的工具。在每一个湿地中,非生物的和生物的参数变化性,还不能使湿地管理实践标准化。因此,需要找到一种适用的工具,由这种工具能够导出每一湿地的适宜管理程序。由于历史上长期定量数据不足,野外观测、当地经验知识、图书情报信息和比较数据,都可用于创建定性模式。而新模式用于湿地生态控制实践,并在实践中获得更多信息,以备进一步改进模式。

二、流域干旱控制:农户生态经济模式

众所周知,水是农业的命脉,水文生态动力源对农业经济发展的作用也为社会所公认。但直到目前,关于水文减灾,尤其是干旱减轻与有林的河流流域之间的生态经济的关系,定量模式尚少。在环境可持续发展的经济学研究中,近年有人(Pattanayak *et al.*, 2001)提出并应用叫做农户模式的定量方法处理水文模造问题,为流域生态经济的优化控制提供了依据。下面概述之。

农户总是希望取得最大效用(utility) U ,该效用 U 被假定为农产品 X (例如谷物)和输入 Y 的一个连续的二次可微凹函数。该函数以农户特征 H 为条件。效用最大值与四个约束条件有关。第一,输入约束意味着“自身”输入供给 R 和“自身”输入消耗 Y ,不能超过农户输入 T ,这里的 T 依赖于农户特征 H 。第二,农业生产的连续凸函数 F (假定那里基础流为 W)是一个固定的输入,该输入计量该农场的本底干旱环境。 W 是对其他生产输入 V 或输出 Q 的弱补足,因为没有农户生产, W 就是零。生物学和社会经济学输入 Z 也考虑生产技术。第三,农户的预算约束,确保支出等于农户输入资金当量、农业收益 π 和外源收入 E 的和。第四,市场环境约束,说明市场环境的作用。市场约束的精确性质确定限制参数 M_Q 和 M_v 的大小。方程(5-36)描述效用最大问题。

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{x,y,q,v,\lambda,\mu} \\ & \mathcal{L} = U(X, Y; H) + \lambda [P_v \cdot T(H) + (p_Q \cdot Q - p_v V) + E - p_v Y - p_Q \cdot X] \\ & \quad - \phi [F(Q, V; W, Z)] + \mu_Q [M_Q + Q + X] + \mu_v [M_v - V + T(H) - Y] \quad (5-36) \end{aligned}$$

最大值问题的一阶条件已由 Pattanayak(2001)给出并假定 U 和 F 具有“确保效用最大化二阶条件成立”的各种性质。

因为 W 是生产者利益,基础流的增加(干旱减轻),通过生产过程增加了农户福利 u ,它的值是用利润的增加值 $d\pi$ 来测量的,这里的 $d\pi$ 等于边缘 WTP,即 $dWTP$ 。该 $d\pi$ 是外源收入量 dE 。经推导(Pattanayak, 2001)得出

$$\begin{aligned} dv = 0 \Rightarrow dWTP &= -\frac{dE}{dW} = -\frac{\psi}{\lambda} \cdot F_W = \left[\frac{\psi}{\lambda} \cdot F_Q \cdot Q_W + \frac{\psi}{\lambda} \cdot F_v \cdot V_W \right] \\ &= \left[P_Q - \frac{\mu_Q}{\lambda} \right] \cdot Q_W - \left[p_v + \frac{\mu_v}{\lambda} \right] \cdot V_W = \frac{\partial \pi^{\text{观测}}}{\partial W} + \frac{\partial \pi^{\text{阴影}}}{\partial W} \quad (5-37) \end{aligned}$$

干旱减轻的边缘利润等于观测到的边缘利润加上“阴影”边缘利益。当农户面对市场引起的虚价格时,这种“阴影”边缘利润就会出现(关于阴影价格的概念,详见 Jacoby 1993 年发表在 *Review of Economic Study* 的第 60 卷第 903~921 页的论文)。

Pattanayak 等(2001)的研究表明,水文模造可以同应用微观经济理论、计量经济学方法结合起来以评价一个复杂的生态系统:在一个发展中国家的农耕区内,森林繁茂的河

流流域所形成的减轻干旱作用。干旱减轻作用可以用农户边缘利润来评估。据推导,利润变化是测定环境作用(实际是水文生态动力作用)的适宜量数。

该研究用确定性的微分方程模式作理论上的说明,又利用印度尼西亚东部的数据作了统计分析与综合。指出保护流域生态环境,对于农业经济的效果。为人们优化流域生态环境——这是一种从水文、森林,即非生物和生物生态动力源方面,优化控制农耕地生态动力源——提供科学理论依据。所以说,它对于宏观生态控制研究有一定学术价值和实用意义,为有关部门决策提供科学依据,也是生态学、水文学、森林学、市场经济学共同协作,为生态经济控制服务的一种新方法。当然,由于这方面涉及的因素十分复杂,现有资料和模式,暂时不能很客观地反映其中的规律,误差难免。有待今后应用中改进。我国七大江河流域,农耕地面积广阔,流域内森林覆被差异悬殊,如能参照有关方法加以研究,会对水文生态与经济发展做出贡献,当然,小流域也可以做。

三、生态农场污水处理的使用最优控制

一般说来,生态农场是含有农业、牧业、林业、渔业以及工厂化大农业生产项目的农场,其目标是既保障生产的经济效益又能使生态良性循环不致造成各种生态动力源的污染。我们这节试以牧业养殖为主的农场为例,即牧场在其中占有主导地位,所以牧场排放因为水中含有污物、水的富营养化首先危害水文生态动力源,并由此污染土壤生态动力源和气象生态动力源;如被污染的水用于植物和动物的水分供给,会使污染物残留于其产品之中,倘这些产品作为食品、食物为人、畜食用,后果严重。所以,科学地处理污水成为一项重要的环保任务,也是生态环境优化的必须措施。但以往的处理方案,从宏观上较少有客观定量的方案,尤其是沿河流有多个单位,总是各单位分别加以处理,如此的“各扫门前雪”的方案,从生态、经济和社会效果考虑,是否合理?实用者似乎未曾多加分析评价,以致对污水控制得是否为最优,未曾引起实用管理者的重视。下面阐述作者具体计算的模型实例,以数学方法演示该优化控制的思路和运行的全过程。

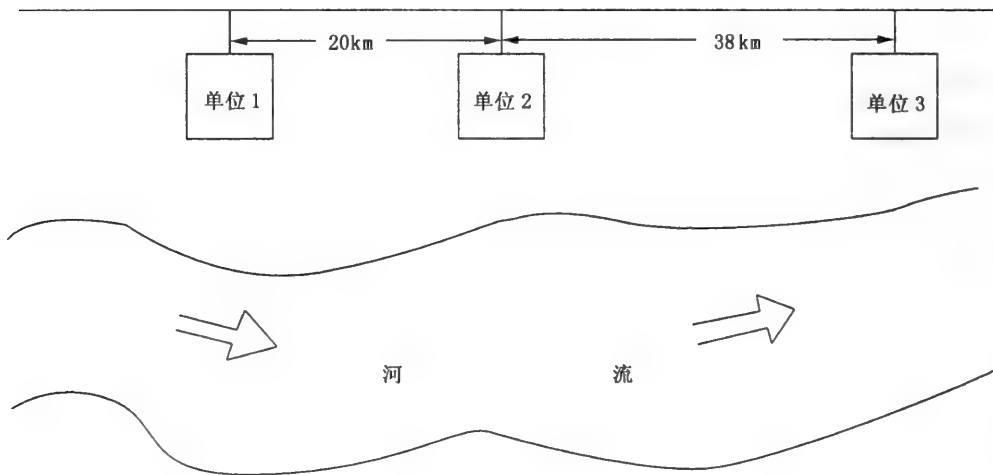


图 5-2 沿河三单位地理位置示意

1. 具体问题的提出和方案初步选择

如图 5-2 所示,在某经济技术开发区,欲兴建三个农业生产单位——农场,各单位

在投产后,因生产流程的需要,都必须向同一条河中排放经过处理的污水。为此,就一定要建设污水处理厂。三个单位,或者各单独建立污水厂,或者以不同的合作方式联合建污水处理厂,用管道对污水进行集中处理。

现在让我们用 Q 表示污水量(单位: $t \cdot s^{-1}$),用 L 表示管道长度(单位: km)。

根据以往的经验评估,并用有关资料以概率统计方法写出关于建厂的费用 C_T 和铺设管道的费用 C_P 的如下两个经验公式:

$$C_T = 720 Q^{0.722} \quad (5-38)$$

$$C_P = 6.4 Q^{0.52} L \quad (5-39)$$

现已知该三个单位的污水量分别是:

$$Q_1 = 5$$

$$Q_2 = 3$$

$$Q_3 = 5$$

2. 几种方案及各自投资总额的计算

方案 I

该种方案系由各单位投资分别建本单位的污水处理厂,此时只投资建厂费用,这样,单位 1 的投资总额 $C(1)$ 便等于该单位的建厂费用 $C_T(1)$,其他单位类同,于是,我们由式(5-38)经计算得出如下结果:

$$C(1) = C_T(1) = 720 \times 5^{0.722} = 2301$$

$$C(2) = C_T(2) = 720 \times 3^{0.722} = 1592$$

$$C(3) = C_T(3) = 720 \times 5^{0.722} = 2301$$

投资总额为 S_1 ,有

$$S_1 = C(1) + C(2) + C(3) = 6194$$

方案 II

该方案及此后两方案是这三个单位,每两个单位合作,共有组合情况是: $C_3^2 = A_3^2 / P_2 = (3 \times 2) / 2! = 3$ 种合作方式。

第一种合作方式,系单位 1 和单位 2 合作,这时,单位 1 和 2 将从节约资金的目标出发,考虑是联合建厂并铺设管道合算还是各自独立建厂合算,所以单位 1 和单位 2 的优化投资控制方案,应当是

$$C(1,2) = \min \begin{cases} \text{联合: } 720 \times (5+3)^{0.722} + 6.4 \times 5 \times 0.52 \times 20 = 3564 \\ \text{独立: } C(1) + C(2) = 3893 \end{cases} = 3564$$

$$C(3) = 2301$$

所以,投资总额

$$S_2 = C(1,2) + C(3) = 5865$$

方案 III

单位 2 和单位 3 合作。于是,我们有

$$C(2,3) = \min \begin{cases} \text{联合: } 720 \times (3+5)^{0.722} + 6.4 \times 3 \times 0.52 \times 38 = 3662 \\ \text{独立: } C(2) + C(3) = 3893 \end{cases} = 3662$$

$$C(1) = 2301$$

所以,投资总额

$$S_3 = C(2,3) + C(1) = 5963$$

方案Ⅳ

单位 1 和单位 3 合作。于是,我们有

$$C(1,3) = \min \left\{ \begin{array}{l} 720 \times (5+5)^{0.722} + 6.4 \times 5^{0.52} \times 58 = 4653 \\ C(1) + C(3) = 4602 \end{array} \right\} = 4602$$

$$C(2) = 1592$$

所以,投资总额

$$S_4 = C(1,3) + C(2) = 6194$$

方案Ⅴ

单位 1、单位 2 和单位 3 三家共同合作。于是,我们有:

$$C(1,2,3) = \min \left\{ \begin{array}{l} 720 \times (5+3+5)^{0.722} + 6.4 \times 5^{0.522} \times 20 + 6.4 \times 8^{0.52} \times 38 = 5601 \\ C(1,2) + C(3) = 5865 \\ C(2,3) + C(1) = 5963 \\ C(1,3) + C(2) = 6194 \\ C(1) + C(2) + C(3) = 6194 \end{array} \right\} = 5601$$

方案比较

比较以上的 5 个方案(I ~ V)可知,应该选择三个单位共同合作即联合建厂排污的方案。

3. 费用分担额的粗算:联合对策合理性问题

在经由上述计算过程,得知由三个单位联合为最优控制方案的结果之后,下一步的问题就是各厂各自应负担多少份额的问题。

单位 3 的法人代表提出:联合建厂的费用按三单位污水量之比 5:3:5 分担;主设管道费用应由单位 1 和单位 2 负担。单位 2 的法人代表同意上述分担方案,并提出,从单位 2 到单位 3 的管道费用由单位 1 和单位 2 按污水量之比 5:3 分担;从单位 1 到单位 2 的管道费用,应由单位 1 自行负担。单位 1 的法人代表觉得上述提议似乎是合理的,但因事关重大,该法人代表没有马上表态,而是先算后定。

4. 联合建厂的费用计算

三个单位联合建厂的费用是: $720 \times (5+3+5)^{0.722} = 4587$; 单位 1 到单位 3 的管道费用是 $6.4 \times (3+5)^{0.52} \times 38 = 717$; 单位 1 到单位 2 的管道费用是 $6.4 \times 5^{0.52} \times 38 = 717$; 单位 1 到单位 2 的管道费用是 $6.4 \times 5^{0.52} \times 20 = 297$ 。如果按上述提议的比例分担,各单位应负担的费用比例及数额是:

单位 3, 建厂费用的比例为 5/13, 费用数额 $D(3) = 4587 \times 5/13 = 1764$;

单位 2, 建厂费用的比例为 3/13, 费用数额 $D(2) = 4587 \times 3/13 + 720 \times 3/8 = 1329$;

单位 1, 建厂费用的比例为 5/13, 费用数额 $D(1) = 4587 \times 5/13 + 720 \times 5/8 + 297 = 2511$ 。

拿以上计算的联合后的各单位费用总额同各单位独立建厂的费用总额比较,结果是

$$\text{单位 1} \quad 2511 > C(1) = 2301$$

$$\text{单位 2} \quad 1329 < C(2) = 1592$$

$$\text{单位 3} \quad 1764 < C(3) = 2301$$

可见,按联合方案,单位 2 和单位 3 的投资都比单独少;而单位 1 比单独建厂多。这样一

来,单位 1 的法人代表当然不能同意本单位多投资。但对于这样的问题,一时又找不出合适的即公平合理的解决办法。怎样才能解决合理分担费用的问题呢?

我们应当从生态经济效益方面考虑问题。从前面的计算结果可知,正是因为实施了联合对策,才使三个单位投资总额节省

$$S_1 - S_3 = 6194 - 5602 = 594$$

这样的经济效益实际上是为实现人工生态动力源应付出费用的节省额,该节省额的利益当然由三个单位共享。至于如何共享,如何分配,则由下面的过程说明。

5. 生态控制合作对策论

生态控制合作对策,乃是对策论中的合作对策原理在生态控制和环境治理中的应用。

先说明一下对策论中比较有名的“三人经商问题”,作为提出对策模型的基础。

甲、乙、丙三人经商,如果单干,每人仅能获利 1 元;甲、乙两人合作,共可获利 7 元;甲、丙两人合作,共可获利 4 元;三人合作,共可获利 10 元。问三人合作时,应当如何分配这 10 元的收入?下面分析这个问题的求解过程。

甲的收入应当按照甲对各种形式合作所做出的贡献来确定。所谓甲“对某一合作形式的贡献”,其定义是:有甲参加时,这个合作的收入与无甲参加时这个合作的收入之差。例如,甲对甲、乙两人合作的贡献是 $7 - 1 = 6$ (因为甲、乙两人合作获利 7 元,而乙单干仅获利 1 元)。甲可以参加的合作有四种形式:甲自己经商(单干视为合作的特例);甲乙合作;甲丙合作;甲、乙、丙三人合作。甲对这些合作的贡献依次是: $1 - 0 = 1$ 元(甲单干); $7 - 1 = 6$ 元(对甲乙合作贡献); $4 - 1 = 3$ 元(对甲丙合作的贡献); $10 - 1 = 9$ 元(对甲乙丙合作的贡献,即在“乙、丙两人已合作可获利 4 元”的前提下,如果甲加入之后的贡献)。甲应当分得的收入是上述四种贡献的加权平均值,其加权因子则由下面将要论述的一般模型给出。

一般地说, n 人合作对策模型是:

记 n 人集体为 I , 表示为

$$I = \{1, 2, \dots, n\}$$

如果对于 I 的叙述一子集 $S \in I$, 都对一个实值函数 $v(S)$, $v(S)$ 满足

$$v(\emptyset) = 0 \quad (5-40)$$

$$v(S_1 \cup S_2) \geq v(S_1) + v(S_2) \quad (S_1 \cap S_2 = \emptyset) \quad (5-41)$$

则 v 被叫做定义在 I 上的特征函数。所谓合作对策是指定义了特征函数的 I 中 n 个人的合作结果,用向量值函数

$$\phi(v) = (\varphi_1(v), \varphi_2(v), \dots, \varphi_i(v), \dots, \varphi_n(v)) \quad (5-42)$$

来表示。在实际问题中,常可把 I 中各种组合形式的合作所获得的利益定义为特征函数。式(5-41)表示合作规模过大时,获利不会减少。 $\varphi(v)$ 则是 n 人合作获利的分配结果。 $\varphi_i(v)$ 是成员 $\{i\}$ 的获利。不难看出,如果将三人经商问题中的合作获利定义为特征函数 v , 那么 v 就满足式(5-40)和式(5-41)。

6. Shapley 公理系及求解问题简介

为了确定 $\phi(v)$, 须用 $\phi(v)$ 应当满足的一组公理,即数学中的 Shapley 公理系。让我们先简述该公理系及有关求解问题,以备在下一段求解我们面临的具体应用。

设 v 是定义在

$$I = \{1, 2, \dots, n\}$$

上的特征函数,并且

$$\phi(v) = (\varphi_1(v), \varphi_2(v), \dots, \varphi_i(v), \dots, \varphi_n(v))$$

是合作对策。则有如下公理

公理 1

设 π 是

$$I = \{1, 2, \dots, n\}$$

的一个排列,对于 I 的任一子集 $S = \{i_1, i_2, \dots, i_s\}$, $\pi S = \{\pi(i_1), \dots, \pi(i_s)\}$. 若再定义一个特征函数 $W(S) = v(\pi S)$, 则对于每一个 $\{i\} \in I$, 我们有

$$\varphi_i(\omega) = \varphi_{\pi(i)}(v) \quad (5-43)$$

公理 1 表示:合作获利对于每个人的分配,与赋予他的记号 $\{i\}$ 无关。

公理 2

各个人分配之和,等于合作获利,即

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i(v) = v(I) \quad (5-44)$$

公理 3

如果对于包含 $\{i\}$ 的一切子集 S , 都有

$$v(S - \{i\}) = v(s)$$

则有

$$\varphi_i(v) = 0 \quad (5-45)$$

公理 3 表示:如果 $\{i\}$ 对于他参加的每一合作都没有贡献,那么他就不应当从全体的合作获利中取得任何报酬。

公理 4

如果 v' 也是定义在 I 上的特征函数,并且

$$W = v + v'$$

那么

$$\phi(w) = \phi(v) + \phi(v') \quad (5-46)$$

这个公理说明:当 n 人同时进行两项合作时,从合作中所获利应当如何分配给每一个人。

Shapley 已证明了满足公理 1~4 的 $\phi(r)$ 是唯一的,并且证明满足这组公理的 $\phi(v)$ 的唯一解是

$$\varphi_i(v) = \sum_{s \in S_i} (w(|s|)v(s) - v(s - \{i\})) \quad (5-47)$$

$$i = 1, 2, \dots, i, \dots, n$$

其中 S_i 是 I 中含 $\{i\}$ 的所有子集, $|s|$ 是集合 S 中的人数, $w(|s|)$ 是加权因子,由

$$w(|s|) = \frac{(|s| - 1)! (n - |s|)!}{n!} \quad (5-48)$$

确定。式(5-47)中 $[v(s) - v(s - \{i\})]$ 可以看作成员 $\{i\}$ 对合作 s 的贡献, $\sum_{s \in S_i}$ 表示对所有包含 $\{i\}$ 的集合求和。 $\phi(v)$ 称为由 v 定义的合作的 Shapley 值。

7. 合作对策中各自费用分担计算

为用 Shapley 值方法来解决三单位合作对策方案中各个单位应当分担的费用问题,

我们首先定义特征函数为合作比单干所节省的投资,于是有

$$v(\phi)=0$$

$$v(\{1\})=v(\{2\})=v(\{3\})=0$$

$$v(\{1,2\})=C(1)+C(2)-C(1,2)=2301+1592-3564=329$$

$$v(\{1,3\})=C(1)+C(3)-C(1,3)=2301+2301-4602=0$$

$$v(\{2,3\})=C(2)+C(3)-C(2,3)=1592+2301-3662=231$$

$$v(\{1,2,3\})=C(1)+C(2)+C(3)-C(1,2,3)=2301+1592+2301-5602=594$$

显然, v 满足式(5-40)和式(5-41), $\phi(v)$ 应为三个单位合作所得利益对各个单位的分配。经计算得 $\varphi_1(v)=237$, $\varphi_2(v)=246$, $\varphi_3(v)=110$ 。

这样,在三单位联合中,各单位分单费用为:单位 1 是 $C(1)-\varphi_1=2064$;单位 2 是 $C(2)-\varphi_2=1346$;单位 3 是 $C(3)-\varphi_3=2191$ 。

8. 推广应用与讨论

生态农场污水处理的最优控制,可以用属于对策论的合作对策模型加以解决。其实,在生态控制的相当多的问题中,合作对策模型,实际上都是很有用的。只是在具体处理某一问题时,要结合那个问题,充分考虑具体数据的含义。也有些问题,当然要比向河流中排放处理过的水要复杂得多。比如,风沙和大气中的真菌孢子,昆虫、病菌的传播,必然涉及动态的空气流动,而空气流动的变化规律比河水流动复杂,变动性大。下面,分述几例。

(1) 农田防护林防风控制的合作对策

农田防护林,仅就防风之目的,也显然存在着合作对策问题。因为防护林网群体的联系要比单一的防护林网复杂得多。按盛行风向,上游防护设施建设得好,尤其是有高大乔木的林网,对下游必然起到一定的保护作用,所以上下游须联合,而各自应投资多少,就要用 Shapley 公理加以计算。

(2) 沙尘暴治理的合作对策

某一城市沙尘暴一般是由其上风向土地沙化等因素引起的。比如沈阳市的沙尘暴,其沙源在其西北部的科尔沁以致更远的地方,为了治理,不仅要在沈阳市的周边植树种草,更要注意对上游的生态改造。在这种改造中,有关市、县如何合作为好,各城市应负担多少费用合适,也必须用 Shapley 公理。

(3) 排除河中泥沙的合作对策

为了排除一条河流中的泥沙,上、中、下游各单位都应努力,合作完成。在这种合作中沿河各地相互影响十分复杂,所以须用科学方法规划治理的合作方案。

(4) 病虫害防治的合作对策

有许多害虫,如蝗虫迁飞涉及很远,上、下游间关系复杂,所以联合对策须由非常多的具体防御单位共同努力,以达到大范围受益之目标。这就不限于本节例举的三个单位的问题了,而是很多乃至数千上万个单位共同努力。但所用对策模式仍是一样的,数字多了,用计算机处理即可。

(5) 人工影响和利用云水资源的合作对策

我国从 2002 年已开始实施国务院发布的《人工影响天气条例》,这是改善农作物水文条件、增强水文生态动力正效应的一种新措施。在具体实行时,拿目前辽宁省的情况,是 14 个市(地)各自为单位,独立开展,但由于在一个省这么大的范围,就大气运动的尺

度来说,并不算很大,运动规律颇一致。如果上游将空中的云水引入地面过多,下游必然“享受”得少;而且 14 个机场都设“备战”机组,支付费用也较多,不如共同投资合作对策,引用本节模型当可有效。

四、放射性废物海底处理模式及生态控制意义

在第二章第二节我们简述过放射性物质对水生生物和水质污染的问题。因为这是核工业、核试验对人类生存环境污染的大问题,尽管在污染物排放到水中的当时或其后短时间内不致造成很明显的危害,但长远危害可能相当大。核工业部门从经济利益出发,总是想尽量省钱地处理掉放射性废物,但这总会引起生态学家反对。因为控制污染物进入人类生存环境是生态学家的“天职”。如不用反映污染物机理的数学模型,则无法定量地说明其危害。

某国家原来处理浓缩放射性废物的办法是:核工业部门将其装入密封好的圆筒内,扔到 $300 \times 0.3048\text{m}$ 深的海中。生态学家认为这样做会污染海水;核工业部门则辩解说,圆筒坚固不破,不漏,所以放在这种圆筒中的放射性废物不会污染海水,他们的做法可保证废物绝不会污染海水,可确保环境的绝对安全。

事实果真能保证安全吗?为了控制放射性废物就要控制好装它们的那些圆筒。到达海底的那么多圆筒,相互碰撞,会不会裂开呢?这一污染物控制问题的关键成了理论力学和材料力学中的圆筒碰撞速度问题了:圆筒以多大速度碰撞,圆筒与海底碰撞时的速度是多少?

为求解这一问题,先在力学实验室对所用圆筒进行试验。结果表明:圆筒在直线速度为 $40 \times 0.3048\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲击下就会破裂。剩下的问题是求圆筒沉入 $300 \times 0.3048\text{m}$ 即 91.44m 深的海底时的末速度。

已知核工业部门用于处理该种废物的圆筒是容量为 55gal . ($1\text{gal} = 3.785411\text{L}$) 的圆筒,装满放射性废物的圆筒的重量是 $W = 527.436\text{lb}$ ($1\text{lb} = 373.24\text{g}$),而在海底受到的浮力 $B = 470.327\text{lb}$,海水阻力 $D = Cv$,式中 C 为常数,通过力学实验, $C = 0.08$ 。

取一个垂直向下的坐标,以海平面为其坐标原点,即 $y = 0$ 。于是,依牛顿第二定律,我们有

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = W - B - D \quad (5-49)$$

注意到

$$\begin{aligned} m &= \frac{W}{g} \\ &= Cv \\ \frac{dy}{dt} &= v \end{aligned}$$

式(5-49)可以改写为

$$\frac{dv}{dt} + \frac{Cg}{W}v = \frac{g}{W}(W - B) \quad (5-50)$$

式(5-50)是一个一阶线性常微分方程,且满足初始条件

$$v(0) = 0$$

其解为

$$v(t) = \frac{W-B}{C} [1 - \exp(-\frac{Cg}{W}t)] \quad (5-51)$$

由已知数据和式(5-51),我们得出

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = \frac{W-B}{C} \approx 713.86(\text{ft} \cdot \text{s}^{-1})$$

如果极限速度 $\leq 40 \text{ ft} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1\text{ft} = 30.48\text{cm}$),那么就不会造成污染了。但事实上,同 $40\text{ft} \cdot \text{s}^{-1}$ 的相应承受力作比较,圆筒的极限速度实在太大了。

为了求出圆筒与海底的碰撞速度 $v(t)$,必须求出圆筒下沉时间 t 。但这个 t 是很难求的。欲求之,须将 v 表示为下沉速度 y 的一个函数,即有:

$$v(t) = v[y(t)]$$

依据对复合函数求导数的链导法,我们可以写出

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \cdot \frac{dy}{dt}$$

式(5-49)于是成为:

$$m \frac{dy}{dt} \frac{dv}{dy} = W - B - Cv$$

或

$$\frac{v}{W - B - Cv} \frac{dv}{dy} = \frac{g}{W}$$

注意到 $v(0)=0, y(0)=0$, 对上式两边积分,我们得出:

$$-\frac{v}{C} \cdot \frac{W-B}{C^2} \ln \frac{W-B-Cv}{W-B} = \frac{gy}{W} \quad (5-52)$$

接着用数值方法来求 $v(300)$ 的近似值。结果得出:

$$v(300) = 45.1 \text{ ft} \cdot \text{s}^{-1}$$

该值大于 $40 \text{ ft} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这说明:放射性报废物质装筒入海,必将造成污染,这种放射性污染物必将破坏海水中的鱼类及其他水生生物,以致被人食用后,对人造成威胁。上述结果,是从机理上表明:生态学家原已有的担心是正确的,而用力学方法的计算结果,为生态学家的正确认识,提供了定量的数理依据,使这个生态控制实践走向量化、模式化的轨道。

五、植物改善水质的机理控制模造

下面介绍用凤眼蓝(*Eichhornia crassipes* L.)对水质作可持续改进的模造。富营养过程是水体养分供应增加而使其养分更加丰富的过程。这一术语虽然最常用于有新鲜水的湖泊,但它也能用于流动中的水、港湾和海岸附近混水域。溪流起到的一种作用是把污染物迅速输送到港湾和沿岸环境中去。

人口增长、经济活动已造成人类自身变化中 N 和 P 流的强烈交替,也影响到植物这两种主要的营养物质对水生生态系统的作用。排到地面水中的 N 和 P 总量,是人们所关注的富营养控制问题。外界对水体的营养供给,可以是点源的,也可以是非点源的。点源是局地化的,是比较容易监测的;而非点源是混淆不清的,监测和调节起来,都是要比点源困难得多的(Smith,1999)。

在世界上许多大城市,经济的迅速发展,人口的增长,城市化水平的提高,现代生活

方式,以及城市产业和旅游业负荷的加重,对水的要求显著提高了。对水需求量的越来越多,意味着排水量也增加了。对水需求的增多,是人口增长、城市化水平提高这种趋势的必然后果。曼谷人利用流水作为日常废水排水系统,进入水道中的 N 和 P 的量就会因此而增加,以致水道水中的 N、P 荷载量,受人口密度的影响很大。

本研究的目的是以营养物排除为目标,按可持续最大产量(MSY)改进收获模式,并以该模式研究 N 和 P 排除的优化控制策略。

凤眼蓝是一种水生维管草,这种维管草在世界上的热带和亚热带地区已引起人们极大的关注,因为它一方面有减小被污染了的水的营养水平的功能,另一方面也起到植物生物量的作用。因为凤眼蓝长得快,所以它也广泛地分布在富营养的水道中。凤眼蓝的生物量是可以通过收割进行控制的,控制得好,使其成为理想的植物资源并有益于改进水质。但是,凭定性的认识或感性的估计来控制生物量,主观的成份很大,不利于优化控制。为改变这种情况,作出一些理论性的尤其是确定性的模式是必要的。

本研究用简单的 logistic 生长常规模式,该模式为凤眼兰生长提供一个具有有限环境容量(K)的经验解。

$$\frac{dP}{dt} = rP(1 - \frac{P}{k}) \quad (5-53)$$

式中, P 为生物量($0 \leq P \leq k$); r 为相对增长率; k 为承载容量; t 为时间。

关于凤眼蓝的最高产量,近年有人从理论上和经验上作过研究。凤眼蓝生长的 logistic 曲线理论分析显示,最高产量是按如下方式得到的:经常不断地只收获它的正在生长着的部分,并且保持闭合水体中 $S_m/2$ (S_m : logistic 方程的饱和值 = 方程(5-53)中的 k) 的生物量密度。这里,剩余生产量(dP/dt)是:当 P 等于 $k/2$ 时生物量的最大生产量。这样,如果我们只收获剩余生产量 dP/dt ,那么我们就可持续得到叫做最大可持续收获量(maximum sustainable yield, MSY)的 Y^* 。

数值 $Y^* = dP/dt$ 将是最大的,并可写成如下表达式:

$$Y^* = \frac{kr}{4} \quad (5-54)$$

式中, Y^* 是在最大可持续产量中收获的生物量; r 值是按 Lorber 等的研究,由下式确定

$$r = \frac{1}{W} \{ (P_{g, \max} \cdot f_T \cdot f_N \cdot f_P \cdot f_{den} - R_m) E - D \} \quad (5-55)$$

式中, W 为干物质中风眼兰密度($g \cdot m^{-2}$); $P_{g, \max}$ 为潜在的可能光合作用率($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); f_T 为温度限制函数; f_N 为氮限制函数; f_P 为磷限制函数; f_{den} 为植物密度限制函数; R_m 为呼吸作用维持能力($R_m = 0.01 W$); E 为转变效率($E = 0.83$); D 为碎屑物质($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)。

利用方程(5-54)和(5-55),我们能够确定在凤眼蓝最大可持续收获量时的已收获的生物量 Y^* ,并可以把它改写为如下的形式:

$$Y^* = \frac{k}{4W} \{ (P_{g, \max} \cdot f_T \cdot f_N \cdot f_P \cdot f_{den} - R_m) E - D \} \quad (5-56)$$

在计算中,须根据栽培条件和数据来源确定有关物理参数值以作为生态动力源因子。根据推导和实际观测,可以找出 f_N 与 W_N (水中无机氮浓度)的关系式及 f_P 与 W_P (水中无机磷浓度)的关系。

这样,当 W_N 和 W_P 被定出来的时候,通过收获凤眼蓝,从水中除去的 N 和 P 以及 MSY 就能够由该模式计算出来。收获生物量和营养物质除去量,取决于水中营养物质的浓度和凤眼兰生长的面积。从生长面积来说,如果增加面积,则有利于营养物质的去除。为此,可以扩大湿地和水库的面积,比如在居民建筑物周围,在旅馆和公路附近,设置池塘。这就意味着在废水进入水道之前,用生态方法处理了它。

第四节 与动物(含人)有关的确定性模造

关于动物(包括人)的确定性生态控制模式,一般是以微分方程为基础的。这些模式给出的结果可用于对动物(含人)群体生长发育、繁殖和疾病防治的研究,所以说也是生物医学基础的生态控制原理的一个组成部分。

一、确定性微分方程的差分近似等及在动物(含人)生态控制中应用

在生态学中,人们熟知的一种模型是用常微分方程表示的 logistic 模型:

$$\frac{dp}{dt} = rp(1 - \frac{p}{k})$$

式中的时间 t 是连续变化的。在实际应用中,有时接触到具体问题,往往用离散化的时间(人们通常用时段)来研究问题更为方便。

如果我们取时间间隔 $\Delta t = 1$,那么就可以根据 logistic 方程给出的确定性关系,写出如下形式的方程:

$$\begin{aligned} p_{n+1} - p_n &= rp_n \left(1 - \frac{p_n}{k}\right) \quad n=0,1,2,\dots \\ p_{n+1} &= p_n(1+r) \left\{ \frac{1}{1+r} + \frac{r}{1+r} \cdot \frac{k-p_n}{k} \right\} \\ &= p_n(1+r) \frac{k+r(k-p_n)}{k(1+r)} \\ &= p_n + rp_n \left(1 - \frac{p_n}{k}\right) \\ &= p_n \left\{ 1 + r \left(1 - \frac{p_n}{k}\right) \right\} \\ &= p_n \left\{ \frac{1+r}{1+r} + \frac{r(1+r)}{1+r} \left[1 - \frac{p_n}{k}\right] \right\} \\ &= p_n(1+r) \frac{k+kr-rp_n}{k(1+r)} \\ &= p_n(1+r) \left[\frac{k(1+r)}{k(1+r)} - \frac{rp_n}{k(1+r)} \right] \\ &= p_n(1+r) \left[1 - \frac{r}{k(r+1)} p_n \right] \end{aligned} \tag{5-57}$$

令

$$b = 1 + r$$

及

$$p_n = \frac{k(1+r)}{r} y_n$$

则式(5-57)可以写为

$$\begin{aligned} p_{n+1} &= bp_n \left[1 - \frac{r}{(1+r)k} \frac{r+1}{r} y_n \right] \\ &= bp_n \left(1 - \frac{1}{k} y_n \right) \\ &= bp_n - \frac{bp_n}{k} y_n \end{aligned}$$

即

$$\frac{bp_n}{k} y_n = bp_n - p_{n+1}$$

这是一个一阶非线性差分方程,在实际应用过程中,在给出初值 y_0 后,便可用计算机递推计算出 y_1, y_2, \dots

下面计算两个生态控制方面的例子。

1. 流行病传播控制期的确定与控制

在流行病传播期间,需在一定的时期内加以控制。根据病情确定控制期的时间应适当。比如在牧业中,隔离控制时间太短,控制不力,会使疫情再度复发,影响牧业生产效益;反之,隔离时间过长,也会影响正常的外出放牧时间,也影响牧业生产效益。为了合理控制,就要计算控制的时段长度。

假设某个牧场有 500 只羊,最初发现只有一只患病,如果所有羊都是易感者,设 y_n 表示 n 天后染病羊的只数,则 $500 - y_n$ 表示尚未感染羊的只数。那么,从第 n 天到第 $(n+1)$ 天,感染的只数变化为

$$\Delta y_n = y_{n+1} - y_n$$

由兽医学研究成果已知,这个用差分表示的变化,不仅与已感染的只数成正比,也与尚未感染的只数 $(500 - y_n)$ 成正比。于是,可以得出离散阻滞增长模型,即方程组

$$\begin{cases} \Delta y_n = k y_n (500 - y_n) & (k > 0, \text{常数}) \\ y_0 = 1 \end{cases}$$

实际上,这是一个一阶非线性差分方程。比例系数 k 叫做传染率。由实验数据,通过点绘 Δy_n 相对于 $y_n(500 - y_n)$ 的图形,作直线近似,该近似线的斜率就是 k 。如果已知 $k = 0.002$,则有

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + 0.002 y_n (500 - y_n) \\ y_0 = 1 \end{cases}$$

由迭代法,得出每天感染数,即

$$\begin{aligned} y_0 &= 1, y_1 = 2, y_2 = 4, y_3 = 8, y_4 = 16, y_5 = 31, y_6 = 60, \\ y_7 &= 113, y_8 = 201, y_9 = 321, y_{10} = 436, y_{11} = 492, y_{12} = 500, \dots \end{aligned}$$

由此结果可见,在开始的一周内,该种流行病的蔓延,不是十分迅速,但此后增加迅速。所以,应该在开始一周内及时采取合理的生态控制策略,集中力量,如尽量多投入药物等,以控制病情蔓延。

2. 自然保护区内捕食者-食饵恢复生态平衡时间的计算

在自然保护区(如海岛、山区、封闭湿地)内,生态平衡的维持时间,是人工生态动力

源作必要控制的前提条件。如能科学计算出这样的时间,就赢得了优化生态控制的主动权。在未达到生态平衡时,对保护区不施以人工生态动力源,而在达到平衡后,再行必要调节。

这种计算,仍是从经典的捕食者-食饵的 Volterra-Lotka 模型出发。由该模型

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (a - by)x \\ \frac{dy}{dt} = (-c + hx)y \end{cases}$$

方程中, x 表示食饵; y 表示捕食者; a, b, c, h 均为大于 0 的常数。

对上述连续方程作离散化处理,可以得出相应的差分方程。

先将时间离散化为时段,每个时段相差 1 个时间单位,即总有条件

$$\Delta t_n = 1$$

设在第 n 个时段后,食饵的数量为 x_n ,捕食者数量为 y_n ,与微分方程比较,得出与微分方程相对应的如下两个差分方程

$$\begin{aligned} \Delta x_n &= x_{n+1} - x_n = x_n(a - by_n) \\ \Delta y_n &= y_{n+1} - y_n = y_n(hx_n - c) \end{aligned}$$

式中, a, c 表示另一种群不存在时的常数增长率; b, h 表示捕食系数。这里的 a, b, c, h 均大于 0。

假设某自然保护区内,在维持自身的生态平衡时,最初食饵为 400,捕食者为 10,而系数

$$\begin{aligned} a &= 0.003 \\ b &= 0.0001 \\ c &= 0.09 \\ h &= 0.0002 \end{aligned}$$

这样一来,描述该系统的离散模型为

$$\begin{cases} x_{n+1} = (1 + a)x_n - bx_ny_n \\ y_{n+1} = (1 - c)y_n + hx_ny_n \\ x_0 = 400, y_0 = 10 \end{cases}$$

将系数值代入后得

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1.003x_n - 0.0001x_ny_n \\ y_{n+1} = 0.91y_n + 0.002x_ny_n \\ x_0 = 400, y_0 = 10 \end{cases}$$

因为初始值已知,所以可用迭代法进行计算。现录下其中几组主要数值

- 第 30 天 $x_{30} = 425, y_{30} = 8$
- 第 60 天 $x_{60} = 454, y_{60} = 7(\text{min})$
- 第 176 天 $x_{176} = 550(\text{max}), y_{176} = 30(\text{max})$
- 第 250 天 $x_{250} = 360(\text{min}), y_{250} = 30(\text{max})$
- 第 408 天 $x_{408} = 400, y_{408} = 10$

这说明,大约经过 408 天,该保护区内捕食者与食饵又恢复了生态平衡。

3. 飞蛾的生态控制

一个植物保护试验项目,须释放飞蛾。由于受到气流、温度等多种生态动力因子的

影响,每周释放后存活率为 $r=85\%$,设每周释放 10×10^4 只,试计算 10 周末飞蛾数。

因为连续 10 周释放,所以空中存留飞蛾数是前一天的 85%,加上本次释放数可得

$$\begin{aligned} S_{10} &= 10 \times 10^4 + 10 \times 10^4 \times 0.85 + 10 \times 10^4 \times (0.85)^2 + \cdots + 10 \times 10^4 \times (0.85)^9 \\ &= 10 \times 10^4 \times \frac{1 - (0.85)^9}{1 - 0.85} \\ &= 51.3 \times 10^4 (\text{只}) \end{aligned}$$

二、疟疾的时空动态及其生态控制策略——用数学模拟演示的机理模式

从医学科学史得知,关于疟疾病因的研究,经历一两千年的漫长探索的历史。但从古罗马医生最早的认识看来,他们曾注意到环境的作用,尽管人们在 17 世纪否定了“沼泽地上空有害气体”为疟疾病源的说法,尽管这说法未能说出病源,但涉及的湿地,人们已注意到了。直到 19 世纪,人们才正确认识到小蚊虫是疟疾的传播者。现代传染病学已清楚地指出:疟疾是人类疟原虫感染引起的寄生虫病,主要是由按蚊(*Anopheles*)叮咬传播。在我国最重要的按蚊是中华按蚊(见杨绍基,传染病学,人民卫生出版社,2002)。蚊子叮咬人,使人患病,这是一种生物性质的生态动力源和汇的关系以及蚊子这样生态动力媒介作用。但以往多年,尤其是国内,对这种关系及疟疾流行与人群迁移、访问关系的认识,仍停留在感性认识和一般的描述性理论说明阶段,这样人们就很难用现代手段控制该种疾病的流行。近 10 年来,有些人用微分方程建立模型。

1. 几种数学模式

(1) Ross-Mac Donald 模式

设 N 和 M 分别是人和蚊虫的总数。又设 γ 和 μ 分别是蚊虫叮咬后人的恢复率和蚊虫死亡率。那么, $1/\gamma$ 是人患疟疾的持续时间, $1/\mu$ 是蚊虫生命的数学期望。每个蚊虫对每个人的叮咬率是 β 。在这里,假设人和蚊虫总数是不变的。如果 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 分别是在时间 t 感染疟疾的人数和蚊虫数,那么该系统的动态就可以用如下的两个微分方程描述:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= \beta Y(t)(N - X(t)) - \gamma X(t) \\ \frac{dY(t)}{dt} &= \beta X(t)(M - Y(t)) - \mu Y(t) \end{aligned} \right\} \quad (5-58-1)$$

在该模式中,为确定疾病固定的条件,方程(5-58-1)可表达为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= G_1(X, Y) \\ \frac{dY}{dt} &= G_2(X, Y) \end{aligned} \right\} \quad (5-58-2)$$

该系统有两个平衡条件,它们是

$$u_1^* = \begin{bmatrix} X_1^* \\ Y_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

和

$$u_2^* = \begin{bmatrix} X_2^* \\ Y_2^* \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\beta^2 NM - \gamma\mu}{\beta(M\beta + \gamma)} \\ \frac{\beta^2 NM - \gamma\mu}{\beta(N\beta + \mu)} \end{bmatrix}$$

对于疾病成为固定的情形来说,必要的条件是 u_1^* 呈不稳定的平衡态。这就相当于说,在 u_1^* 处估价的方程(5-58-1)Jacobi 阵

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial X} & \frac{\partial G_1}{\partial Y} \\ \frac{\partial G_2}{\partial X} & \frac{\partial G_2}{\partial Y} \end{bmatrix}_{u_1^*} \quad (5-58-3)$$

有一个正实部分优势本征值。

估价方程(5-58-2),我们得到

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & \beta N \\ \beta M & -\mu \end{bmatrix} \quad (5-58-4)$$

矩阵 A 的本征值是方程

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (5-58-5)$$

的根 λ 。而方程(5-58-4)即是

$$\lambda^2 + (\gamma + \mu)\lambda + (\gamma\mu - \beta^2 NM) = 0 \quad (5-58-6)$$

可以看出,它的两个根都总是实数。其优势本征值是

$$\frac{-(\gamma + \mu) + \sqrt{(\gamma + \mu)^2 - 4(\gamma\mu - \beta^2 NM)}}{2} \quad (5-58-7)$$

当

$$\beta^2 NM > \gamma\mu \quad (5-58-8)$$

时,(5-58-6)是正值。这样,方程(5-58-7)就是疾病成为稳定的条件。

(2) 迁移模式

在该模式中,我们假定在单位时间内,人从地块 i 迁移到地块 j (并无返回者)的比例是 e_{ij} 。设 $n_i(t)$ 是时间 t 在 i 地块的人数,即 $\sum n_i(t) = N$ 。那么,说明该系统动态的方程是

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn_i(t)}{dt} &= \sum_{j \neq i} e_{ji} n_j(t) - \sum_{j \neq i} e_{ij} n_i(t) \\ \frac{dX_i(t)}{dt} &= \beta Y_i(t) (n_i(t) - X_i(t)) - \gamma X_i(t) \\ &\quad + \sum_{j \neq i} e_{ji} X_j(t) - \sum_{j \neq i} e_{ij} X_i(t) \\ \frac{dY_i(t)}{dt} &= \beta X_i(t) \left[\frac{M}{a} - Y_i(t) \right] - \mu Y_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (5-59)$$

式中, $i, j = 1, \dots, a$ 。

为简便起见,我们假定 $e_{ij} = e(i, j = 1, \dots, a)$ 。因此,如果总人数是均匀分布,那么每个地块就有 N/a 个人。这样,方程(5-59)就成为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_i(t)}{dt} &= \beta Y_i(t) \left[\frac{N}{a} - X_i(t) \right] \\ &\quad - \gamma X_i(t) + e \sum_{j \neq i} X_j(t) \\ &\quad - (a-1)e X_i(t) \\ \frac{dY_i(t)}{dt} &= \beta X_i(t) \left[\frac{M}{a} - Y_i(t) \right] - \mu Y_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (5-60)$$

(3) 访问迁移模式

在这里,假定在时间 T_{ij} (时间单位的一部分时间), 有一些人从地块 i 去地块 j 进行访问。在那次访问之后, 这些人又返回其原来所在的地块。假定人是呈均匀分布的, 描述该系统动态的方程是

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_i(t)}{dt} &= \beta Y_i(t) \left[\frac{N}{a} - X_i(t) \right] - \gamma X_i(t) \\ &\quad + \sum_{j \neq i} \beta T_{ij} \left[\frac{N}{a} - X_i(t) \right] Y_j(t) \\ \frac{dY_i(t)}{dt} &= \beta \left[X_i(t) - \sum_{j \neq i} X_j(t) T_{ji} \right] \left[\frac{M}{a} - Y_i(t) \right] \\ &\quad - \mu Y_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (5-61)$$

式中, $i, j = 1, \dots, a$ 。方程(5-61)是考虑到季节性寄主的一种订正模式。为简便起见, 假定 $T_{ij} = T(i, j = 1, \dots, a)$ 。这样方程(5-61)就成为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_i(t)}{dt} &= \beta Y_i(t) \left[\frac{N}{a} - X_i(t) \right] - \gamma X_i(t) \\ &\quad + \beta T \left[\frac{N}{a} - X_i(t) \right] \sum_{j \neq i} Y_j(t) \\ \frac{dY_i(t)}{dt} &= \beta \left[X_i(t) + T \sum_{j \neq i} X_j(t) \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{M}{a} - Y_i(t) \right] - \mu Y_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (5-62)$$

2. 方法

对于每个模式, 都能得到疾病处于稳定状态的条件。首先, 针对疾病未发生地方一般平衡状态, 通过计算, 得出微分方程系的 Jacobi 阵。该矩阵的本征值, 随后得到。对于疾病变为稳定状态来说, 有正实部分的优势本征值是必要的。确保本征值具有正实部分的条件, 同确保疾病有正平衡的条件是一样的。这同“疾病的基本再生率高于 1”这个保障条件也是一致的。

对于具有变动性的异质环境的两个模式来说, 我们也就地块间联系强度的不同值 (也就是说 e 值和 T 值) 作数值模拟。通过这些模拟, 得到达平衡状态所需的时间和疾病流行稳定持续时间。这项模拟是以四阶 Runge-Kutta 方法求微分方程的数值解。现可用的软件很多。

3. 结果和应用

(1) 疟疾成为稳定状态的条件

表 5-1 示不同模式中疟疾稳定发生的条件。

表 5-1 在各种模式中疟疾成为稳定状态的条件

模 式	条 件
Ross - MacDonald(环境连续,即不分为几个部分)	$\beta^2 NM > \gamma \mu$
分成几个部分,没有关联	$\frac{\beta^2 NM}{4} > \gamma \mu$
分成几个部分,有迁移	$\frac{\beta^2 NM}{4} > \gamma \mu$
分成几个部分,有访问	$\frac{\beta^2 NM(1+T)^2}{4} > \gamma \mu$

表中所示条件是用严格的数学推导得出的(见 Torres - Sorando, 1997)。没有运动性的环境使疟疾很难达到稳定状态。在分成几部分的环境条件下,迁移型没有差异。然而,在因子 $(1+T)^2$ 总是正值并大于1的情形下,在分成几部分的环境中,访问型容易使疟疾达到稳定状态。

(2)在异质环境和运动性条件下,对模式的数值分析

图 5-3 和图 5-4 表示异质环境和地块之间运动条件下的模式中,疟疾达到稳定所需时间的一半。就两种类型的运动性(迁移和访问)来说,运动强度越大,达到平衡的时间就越长。这两个图也显示两个模式的平衡流行(equilibrium prevalence)情况。结果显示,在一个分成几个部分的情形下,在地块之间,人的迁移率高且不返回原地的時候,系统容易达到平衡流行状态。但是,在人访问其他地块并返回其原地块的时候,使访问者受影响时间的增加,会使该系统更迅速地达到较严重的流行状态。

(3)在疟疾控制策略中的应用

以上的研究结果对公共卫生控制策略的制定与实施是有意义的。显而易见,环境被分成互不联系的几个组成部分,必然减小疟疾达到稳定状态的机会。因此,将易受感染的一个大区域分成几个部分,使各部分之间孤立存在,是减少疟疾稳定发生状态的一种好的控制策略。如果某一部分地块的人频繁去其他地块,再返回其原来居住的地块,上述控制策略的有效性将会降低。上述策略的改进,实质上是调整可能传染疟疾病的人群这种生态动力汇,减少蚊子这种生态动力媒介作用于人体并通过叮咬将疟原虫这种致病生态动力源注入人体的措施。而生态控制策略,正是通过调节生物与生物之间关系实现的,当然这与药物防治、环境治理等措施是相互促进的。从以上论述可知,控制策略的取得是对疟疾传播机理作数学模造的结果。数学模造方法的有效性是以如下事实为基础的:它允许人们对这些效果作定量预测。在今天,疟疾仍有流行,比如肯尼亚在 2002 年 6 月爆发疟疾,该国西部报告 15.8 万例,至 7 月初已有 294 人病死。所以,疟疾流行生态控制仍很重要。

三、捕食者 - 食饵繁殖最优决策:确定型模式

在生物环境中,现时的繁殖状况,会影响未来的种群规模,但未来的种群规模变化也可能影响现行繁殖决策的最优化。为找出相应控制规律,作捕食者 - 食饵动态研究。

1. 基本控制方程与最优繁殖决策

设 X 和 Y 分别表示食饵和捕食者种群。幼态(幼年,即不成熟)的参数,全用小写的

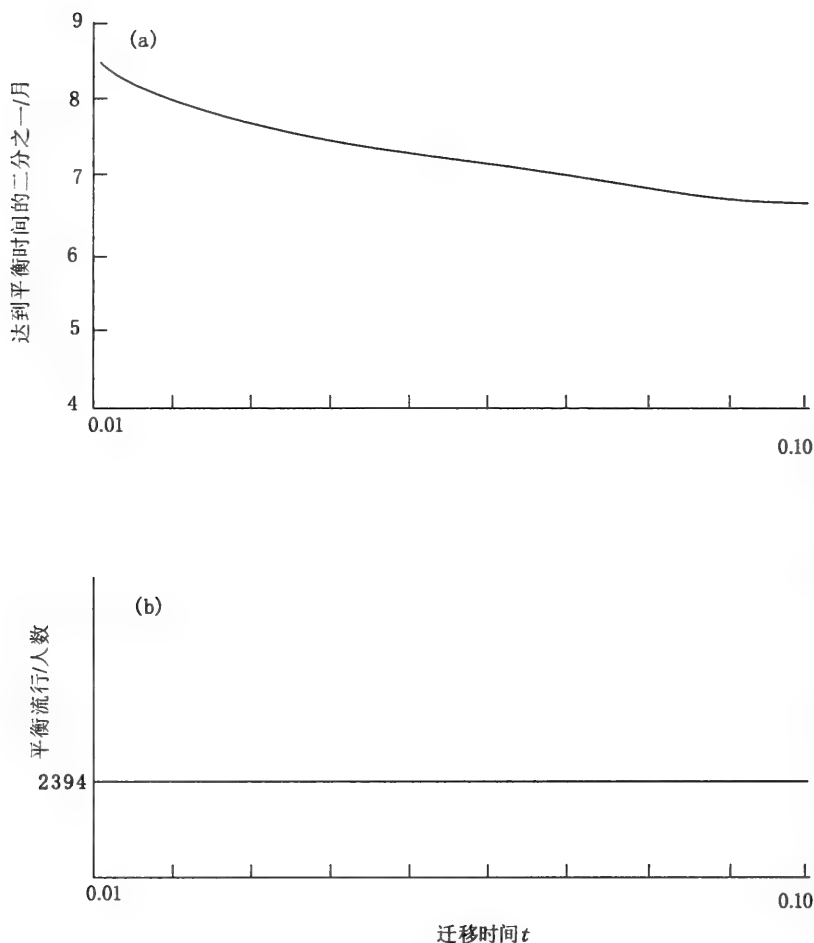


图 5-3 就迁移模式的模拟结果

参数值是: $\beta = 0.0025 \cdot \text{月}^{-1}$, $N = 5000$, $M = 10000$, $\gamma = 0.33 \cdot \text{月}^{-1}$, $\mu = 4 \cdot \text{月}^{-1}$ 。有两个地块。模拟是从一个地块的 1 个被感染的人和 10 头被感染的蚊子开始的。(a) 达到平衡所需时间的二分之一; (b) 在平衡条件下被感染的人数。

x, y , 作为下标来表示。假定在一代之后, 幼态进入成熟(成年)种群, 于是成熟种群规律可被用作密度依赖关系的基础。从一次繁殖机会到下一次繁殖机会的成活概率, 对于成熟者和未成熟者, 分别用 S_x 和 s_x 表示, 繁殖规模用 m_x 表示。食饵动态服从如下方程:

$$X(t+1) = X(t) [S_x(X(t), Y(t), m_x(t)) + m_x(t)s_x(X(t), Y(t), m_x(t))] \quad (5-63-1)$$

同样, 对于捕食者有

$$Y(t+1) = Y(t) [S_y(X(t), Y(t), m_y(t)) + m_y(t)s_y(X(t), Y(t), m_y(t))] \quad (5-63-2)$$

该模式是 Kokko 和 Ranta(1996)模式的推广。将改变繁殖规模(作为备选)的可能性与繁殖的完全抑制相结合。最优繁殖规模 m_x 和 m_y , 将从 S 和 s 对 X, Y 与 m 的依赖关系得出。在二倍体的情形下, 具有重迭世代的有性繁殖种, 在时间 t 的最优行为个体, 将

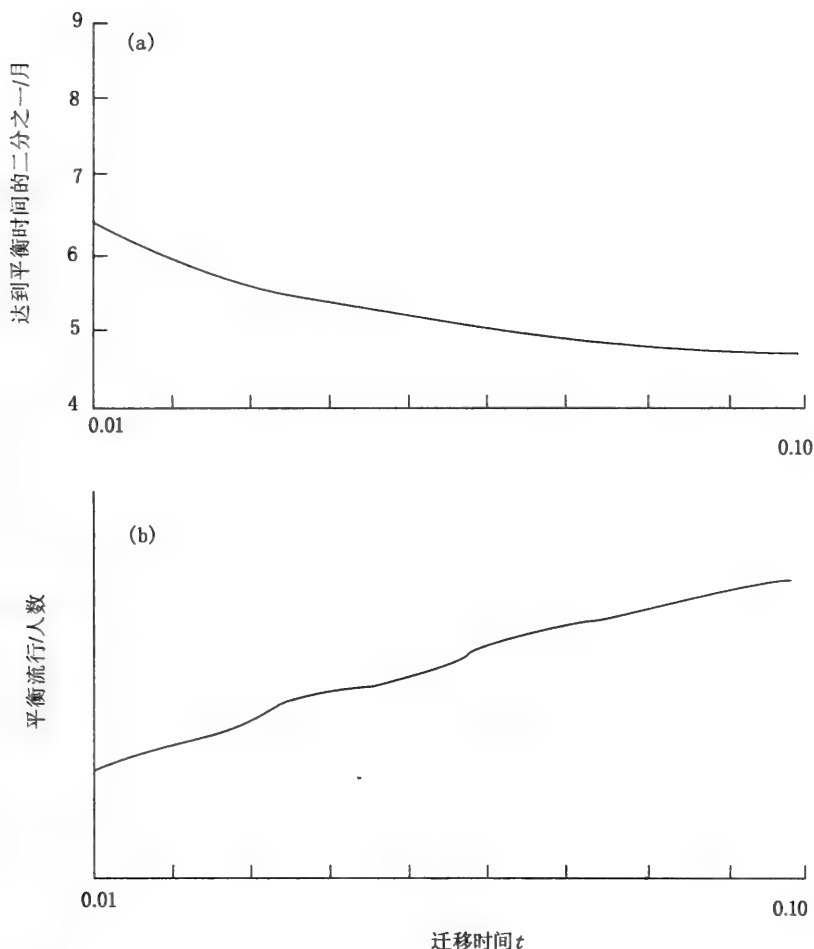


图 5-4 用访问模式的模拟结果

参数值是: $\beta = 0.0025 \cdot \text{月}^{-1}$, $N = 5000$, $M = 10000$, $\gamma = 0.33 \cdot \text{月}^{-1}$, $\mu = 4 \cdot \text{月}^{-1}$ 。有两个地块。模拟只在一个地块,从 1 个被感染的人和 10 头被感染的蚊子开始。(a)达到平衡所需时间的一半;(b)平衡时受感染的人数。

使它们自身繁殖值的和达到最大,而它们的后代,在时间 $t+1$,将被以关系度 r_i 的系数与从第 t 阶段到第 $t+1$ 阶段成活概率 $S_i(t)$ 加权(Kokko and Ranta, 1996)。现假定在时间 t 产生的个体到时间 $t+1$ 成熟,这种成熟标志雌雄对繁殖的下一次机会。这样一来,繁殖值 $V(t+1)$ 关系到那些完全由假定辨识的成熟个体。这样,对于食饵和捕食者来说,将取得最大值的数值分别是

$$V_x = S_x(X, Y, m_x) + \frac{1}{2} m_x S_x(X, Y, m_x) \quad (5-64-1)$$

$$V_y = S_y(X, Y, m_y) + \frac{1}{2} m_y S_y(X, Y, m_y) \quad (5-64-2)$$

为导出最优繁殖决策,必须对 S_x 和 S_y 的函数形式作出假定。两者很可能都是 m_x 的减函数:雌雄对的成活率随雌雄对的努力而减小,并且,每个后代的成活率随着同胞数目而减小。对于成熟、幼态食饵及成熟、幼态捕食者,成活可能性模式可写为如下形式

$$S_x(X, Y, m_x) = S_x(X, Y, 0) \exp(-\alpha_x m_x) \quad (5-65-1)$$

$$s_x(X, Y, m_x) = s_x(X, Y, 0) \exp(-\alpha_x m_x) \quad (5-65-2)$$

$$S_y(X, Y, m_y) = S_y(X, Y, 0) \exp(-\alpha_y m_y) \quad (5-65-3)$$

$$s_y(X, Y, m_y) = s_y(X, Y, 0) \exp(-\alpha_y m_y) \quad (5-65-4)$$

(即繁殖规模以相同因子影响雌雄对和后代)。将方程(5-65-1)和方程(5-65-2)代入方程(5-64-1)并求微商得

$$\frac{\partial V_x}{\partial m_x} = \exp(-\alpha_x m_x) \times \{-\alpha_x S_x(X, Y, 0) + 0.5[S_x(X, Y, 0) - \alpha_x m_x S_x(X, Y, 0)]\} \quad (5-66)$$

就 $\partial V_x / \partial m_x = 0$ 求解, 则得出食饵最优繁殖规模 m_x^* 的如下表达式:

$$m_x^*(X, Y) = \frac{1}{\alpha_x} - 2 \frac{S_x(X, Y, 0)}{s_x(X, Y, 0)} \quad (5-67-1)$$

对于捕食者, 与食饵相似的捕食者最优繁殖规模, m_y^* 的表达式如下:

$$m_y^*(X, Y) = \frac{1}{\alpha_y} - 2 \frac{S_y(X, Y, 0)}{s_y(X, Y, 0)} \quad (5-67-2)$$

这些结果说明: 如果 X 或 Y 的变化造成成熟者对幼态者比率——对于食饵, S_x/s_x 或对于捕食者, S_y/s_y ——增加, 最优繁殖规模将会减小。

2. 可应用对象、现况及未来

在上述动态方程形成之前, 曾有过的关于捕食者的研究是 Korpimäki 研究过的鬼鸮 (*Aegolius funereus*), Pietiäinen 以及 Kolunen 研究过的长尾林鸮 (*Strix uralensis*), Southern 研究过的灰林鸮 (*Strix aluco*), Houston 和 Francis 研究过的大雕鸮 (*Bubo virginianus*), Portenko 研究过的雪鸡 (*Nyctea scandiaca*), Hagen 研究过的毛脚鹰 (*Buteo lagopus*), Simmons 等研究过的白尾鹞 (*Circus cyaneus*), Sulkava 研究过的苍鹰 (*Accipiter gentilis*), Korpimäki 和 Wiehn 研究过的欧亚红隼 (*Falco tinnunculus*) 以及 Angerbjörn 等、Kaikusalo 等、Tannerfeldt 等研究过的北极狐 (*Alopex lagopus*)。如将现有动态方程用于涉及上述捕食者—食饵动态, 会取得更进一步认识。

对于自然保护区、森林公园及野生动物园, 应用优化动态方程并作繁殖决策, 可使其中捕食者—食饵动态平衡趋于长期优化。在农业减灾实际应用方面, 如果用类似方法处理天敌与害虫关系, 使天敌繁殖走向科学化, 对于生态农业发展, 无疑会有指导意义。但这些工作的开展、有待结合比较具体的捕食者—食饵研究对象, 对方程加以改进, 使模式更加完善, 并取得适应于具体对象的解析解、数值解, 必要时与随机方法结合应用。

四、有协助鸟情形下, 巢中性别比率的最优化

在许多合作繁育动物的情形中, 在生命史前期所产后代, 有助于“生育雌雄对”随后的繁殖。这样的协助动态通常限于某一个性别的后代。性别联盟理论 (Sex allocation theory) 指出: “生育雌雄对”过量产出协助的后代, 但是一般认为, 所预期的性别比率程序的偏斜度, 取决于雌雄动物生命史的特定情况。这要从理论上加以检验。Pen 等 (2000) 提出的最优化理论, 有助于优化控制性别比率, 针对的是鸟巢中的鸟, 这首先对于自然保

护区、湿地、森林公园中,优化雌雄鸟比率,达到生态平衡有意义。其次,所论的确定性数学模型方法,对于其他动物的研究,也有价值。简介如下:

1. 性别比率均匀性的调节

我们假定模式机体(model organism)生活在一种季节性的环境中,每季度繁殖一次,没有外界协助者介入,受孕的雌鸟平均生 m 个公幼鸟和 f 个雌幼鸟,这里

$$m = sc\mu \text{ 和 } f = (1-s)c\phi \quad (5-68)$$

式中, s 是在容量为 c 的一个鸟群中公幼鸟的比例; μ 和 ϕ , 分别表示到下一个季度, 公幼鸟和雌幼鸟成活的概率, 我们假定性别比率 s 在母系控制之下, 但是在父系控制情形下, 有完全相同的结果。

设 b_m 和 b_f 分别为测量公幼鸟和雌幼鸟的贡献, 即一个成雌鸟有 h_m 个起协助作用的公幼鸟和 h_f 个起协助作用的雌幼鸟, 那么, 该成雌鸟产 $(1+b_m h_m + b_f h_f)f$ 个雌幼鸟和 $(1+b_m h_m + b_f h_f)m$ 个公幼鸟。假定协助者数目对额外生产的亲子数目, 有附加作用, 设 \bar{h}_m 和 \bar{h}_f 是起协助作用的公幼鸟和雌幼鸟的平均数, 并设 $H = 1 + b_m \bar{h}_m + b_f \bar{h}_f$ 。这样, 雌成鸟平均产 H_m 个公幼鸟和 H_f 个雌幼鸟, 从一个季度到下一个季度, 已生育雌鸟存活概率 p 被假定为与生产性别比率无关, 因此与协助者数目无关。

(1) 最大化生产准则

由 Smith 等提出的 ESS 性别比率 s^* (详见 Pen, 1999), 如果为种群中的有生育能力的大多数雌鸟所“采纳”的话, 是不能受任何突变型性别比率 $s \neq s^*$ 的重大干扰的。换句话说, 在只有 ESS 性别比率特征的一个种群中, 性别比率为 s 有突变型特征的已生育(幼鸟)的雌鸟的繁殖值 $v(s, s^*)$, 当 $s = s^*$ 时, 对于 s 取得最大值。如果 \bar{v}_m 和 \bar{v}_f 分别是雄幼鸟和雌幼鸟的平均繁殖值, 那么, 一只突变型的已生育雌鸟的繁殖值是

$$v(s, s^*) = pv(s, s^*) + r_f H(s) f(s) \bar{v}_f(s, s^*) + r_m H(s) m(s) \bar{v}_m(s, s^*) \quad (5-69)$$

式中, r_f 和 r_m 分别表示已生育雌鸟对它所生育的雄幼鸟、雌幼鸟的遗传关系。假定已生育雌鸟存活概率 P 与其同代性别比率无关。那么, 从 s 着眼, 使 $v(s, s^*)$ 取得最大值的条件是

$$\frac{\partial v}{\partial s} = r \frac{d}{ds} \frac{H(s)}{H(s^*)} \left[\frac{f(s)}{f(s^*)} + \frac{m(s)}{m(s^*)} \right] = 0 \quad (5-70)$$

当 $s = s^*$ 时, 有

$$\frac{1}{2} \left[\frac{1}{f(s^*)} \frac{df(s^*)}{ds} + \frac{1}{m(s^*)} \frac{dm(s^*)}{ds} \right] + \frac{1}{H(s^*)} \frac{dH(s^*)}{ds} = 0 \quad (5-71)$$

从 s^* 着眼, 上述条件相当于乘积 $H_f \times H_m$ 的最大值。

(2) 演化稳定性别比率

从方程(5-68)经推导得出, 当 $dH/ds = 0$ 时, ESS 性别比率 $s^* = 1/2$, 又经推导得出, 导数 dH/ds 有简单形式,

$$\frac{dH}{ds} = H \left(\frac{b_m \bar{h}_m}{s} - \frac{b_f \bar{h}_f}{1-s} \right) \quad (5-72)$$

将 ESS 条件(5-71)代入得出结果

$$\frac{s^*}{1-s^*} = \frac{1+2b_m \bar{h}_m}{1+2b_f \bar{h}_f} \quad (5-73)$$

对于只有一次性协助的情形来说,有公式

$$\frac{\text{起协助作用的性别数目}}{\text{不起协助作用的性别数目}} = 1 + 2b\bar{h} \quad (5-74)$$

式中, b 是每个协助者相对于成对的已生育雌雄鸟的贡献(相对贡献); \bar{h} 是协助鸟的平均数。

于是,得出第一个结论:“起协助作用的性别”对“不起协助作用的性别”的演化稳定比率,减去 1 所得的差值,等于两参数——每巢协助者平均数,每一协助者的平均贡献——乘积的 2 倍。

2. 可选择的性别比率调节

现在假定帮助效益是随某一连续环境变量 t (比如地域质量(Komdeur, 1992))而变化的。为简化起见,我们假定只有一种性别(比如雌性幼鸟)有起帮助作用的倾向。环境变量 t , 按照某种任意概率分布 $p(t)$, 在正规化范围 $[0, 1]$ 内取值, 而帮助效益随着 t 增加。这样,“已生育雌雄对(parents)的 ESS 性别比率策略是:先生产不起协助作用的性别(雄幼鸟)直到点 $t = \tau^*$ 为止,当 t 变得大于 τ^* 时,转而生产起协助作用的性别(雌幼鸟)。在环境 $t \leq \tau^*$ 中只生雄幼鸟的“已生育雌雄对”,有聚类容量 $C_m(t)$, 雄幼鸟以概率 $\mu(t)$ 成长。同样,在环境 $t > \tau^*$ 中的只生雌幼鸟的“已生育雌雄对”,有聚类容量 $C_f(t)$, 雌幼鸟以概率 $\phi(t)$ 成长,这说明在生长中的协助作用。种群的初始性别比率(雄幼鸟/雌幼鸟)是由 $M_1(\tau^*)/F_1(\tau^*)$ 给出的, 这里

$$M_1(\tau^*) = \frac{\int_0^{\tau^*} C_m(t) p(t) dt}{\int_0^{\tau^*} p(t) dt} \quad (5-75-1)$$

$$F_1(\tau^*) = \frac{\int_{\tau^*}^1 C_f(t) p(t) dt}{\int_{\tau^*}^1 p(t) dt} \quad (5-75-2)$$

成长中的后代的性别比率,即次性别比率,是用 $M_2(\tau^*)/F_2(\tau^*)$ 给出的, 这里

$$M_2(\tau^*) = \frac{\int_0^{\tau^*} C_m(t) \mu(t) p(t) dt}{\int_0^{\tau^*} p(t) dt} \quad (5-76-1)$$

$$F_2(\tau^*) = \frac{\int_{\tau^*}^1 C_f(t) \phi(t) p(t) dt}{\int_{\tau^*}^1 p(t) dt} \quad (5-76-2)$$

在环境 t 中,相对于生雌性幼鸟的繁殖值,生雄性幼鸟的繁殖值 $v_m(t)$, 等于雄幼鸟的相对成长概率 $\mu(t)/\phi(t)$ 乘以成长中的雌幼鸟对雄幼鸟的比率。即

$$\frac{v_m(t)}{v_f(t)} = \frac{\mu(t) F_2(\tau^*)}{\phi(t) M_2(\tau^*)} \quad (5-77)$$

ESS 转换点 τ^* 是指在 τ^* 生雄幼鸟、生雌幼鸟,有相同的繁殖值。换句话说有

$$C_m(\tau^*) v_m(\tau^*) = C_f(\tau^*) v_f(\tau^*) \quad (5-78)$$

并经证明(Pen *et al.*, 2000)。如果 $\mu(t)$ 和 $\phi(t)$ 都随 t 增加,那么

$$M_2(\tau^*) < \mu(\tau^*) \frac{\int_0^{\tau^*} C_m(t) p(t) dt}{\int_0^{\tau^*} p(t) dt} = \mu(\tau^*) M_1(\tau^*) \quad (5-79)$$

同样, $F_2(\tau^*) > p(\tau^*)$ 。又经证明, 如果 $\mu(t)$ 和 $\phi(t)$ 随 t 减小, 式(5-79)中的不等号相反, 我们得到 $M_1(\tau^*) < F_1(\tau^*)$ 。即有第二个结果。

第二个结果: 如果“生育雌雄对”, 按照协助的预期效益, 有选择地调节性别比率, 而不调节聚类容量至协助鸟的出现, 那么, 如果协助鸟在有利的环境条件下诞生, 性别比率的平均值, 就偏向于无协助性别; 如果协助鸟在不利的环境条件下诞生, 性别比率的平均值, 就倾向于有协助性别。

如果当协助鸟存在, “生育雌雄对”增加其聚类容量, $C_f(\tau^*) > C_m(\tau^*)$, 那么, 种群的性别比率可能依条件的利弊而偏向某一方面。例如, 如果 $\mu(t) = \phi(t) = \text{const}$, 那么, $v_m(\tau^*) = 1/M_1(\tau^*)$, $v_f(\tau^*) = 1/F_1(\tau^*)$, 并且由方程(5-78), $M_1(\tau^*) < F_1(\tau^*)$ 。然而, 如果 $\mu(t)$ 和 $\phi(t)$ 增加得足够快, $C_f(\tau^*)/C_m(\tau^*)$ 就足够小, 那么, 再次用第二个结果的证明, 我们有 $M_1(\tau^*) > F_1(\tau^*)$ 。于是有第三个结果。

第三个结果: 如果“生育雌雄对”, 按照预期的协助效益, 有选择地调节性别比率, 并且“生育雌雄对”调节聚类容量至协助者出现, 那么, 性别比率的平均值, 就能偏向两个性别中的一个性别, 究竟偏向于哪个方向, 这取决于雌、雄鸟生命史的详细情况。

五、生物量谱、丰度对生物大小的依赖关系: 最优分布及优化控制

在这一部分, 我们将在“生态系统是自组织系统”的假定条件下, 论述其最优功能、最优结构和最优相异性等问题, 由此说明, 最优化只在一定的目标函数和确定的限制性条件下, 才有其意义。

1. 谱分析及其维数的基本变量

生物量, 种群数和体型大小的因次, 被分别定为 M , N 和 S , 这里表示大小的可以是长度, 可以是体积, 也可以是身体的质量。 $B(s)$ 和 $P(s)$ 分别表示生物量和丰度谱密度的分布函数。它们的量纲是 M/S 和 N/S 。总生物量和种群数总计可以用公式表示为

$$TB = \int_0^{\infty} B(s) ds \quad (5-80)$$

$$TN = \int_0^{\infty} P(s) ds \quad (5-81)$$

式中, TB 和 TN 分别用 M 和 N 表示。经过正态化处理和推导(Han, 2001), 有

$$B(s) = P(s)m \quad (5-82)$$

式中, m 是身体的质量。而多个体的平均质量是

$$\bar{m} = \int_0^{\infty} \rho(m) m dm \quad (5-83)$$

这里 $\rho(m)$ 是质量的正态化密度。

2. 生物量谱密度, 丰度谱密度的模式及其分布性质

Han 等建立了这方面的四个模式。为了了解该四种模式下的谱特征, 现定量分析各模式的分布性质, 所用方法是解析这些连续谱函数的导数。

(1) 模式 I

$$\frac{d\rho(m)}{dm} = -\frac{\exp(-m/\bar{m})}{\bar{m}^2} \quad (5-84)$$

$$\frac{d\beta(m)}{dm} = \frac{1}{m^2} \left(1 - \frac{m}{\bar{m}}\right) \exp(-m/\bar{m}) \quad (5-85)$$

丰度谱密度的分布函数的导数总是小于或等于零,丰度的谱密度随着身体大小的增加而减小,在 $m=0$ 时,达到它的最大值。生物量的谱密度是一条具有单峰的曲线,在一切个体的平均质量的情形下,生物量的谱密度达到最大。

(2)模式 II

$$\frac{d\rho(m)}{dm} = k_1 \exp(-\lambda_1 c_1 m^{r_1}) [(-\lambda_1 c_1 r_1) m^{r_1-1}] \quad (5-86)$$

$$\frac{d\beta(m)}{dm} = k_1 \frac{1}{\bar{m}} \exp(-\lambda_1 c_1 m^{r_1}) [1 - \lambda_1 c_1 r_1 m^{r_1}] \quad (5-87)$$

对于 $\lambda_1 > 0$ 来说,丰度谱密度的分布函数总是小于或等于零。生物量谱密度的分布函数有峰值,并且在 $m = [\lambda_1 c_1 r_1]^{-\frac{1}{r_1}}$ 处达到其最大值。

(3)模式 III

$$\frac{d\beta(m)}{dm} = 0 \quad (5-88)$$

$$\frac{d\rho(m)}{dm} = -\frac{\bar{m}}{m^2(m_2 - m_1)} \quad (5-89)$$

对于一切身体质量来说,生物量谱密度都是常数,而丰度谱密度总是随着身体质量的增加而减小,而当各个体质量为无穷大时,达到其最小值。

(4)模式 IV

$$\frac{d\beta(m)}{dm} = k_2 \exp(-\lambda_2 c_2 m^{r_2}) [(\lambda_2 c_2)(-r_2) m^{r_2-1}] \quad (5-90)$$

$$\frac{d\rho(m)}{dm} = k_2 \bar{m} \exp(-\lambda_2 c_2 m^{r_2}) [-1 + \lambda_2 c_2 (-r_2) m^{r_2}] m^{-2} \quad (5-91)$$

生物量谱密度、丰度谱密度分布函数的导数,依赖于 Lagrange 乘子 λ_2 值。由于只能得到 λ_2 的数值解, Han 等对 $\lambda_2 > 0$ 和 $\lambda_2 < 0$ 作了讨论。结果表明:由模式 I 描述的连续谱类似于由模式 II 描述的连续谱。当 $\lambda_2 = 0$ 时,由模式 IV 导出的连续谱相应于由模式 III 导出的连续谱。但当 $\lambda_2 > 0$ 时,模式 IV 提供了另一种谱型,生物量谱,看起来像是倒置的棱锥,生物量谱密度随身体质量而增加,丰度谱密度分布是单峰曲线;当 λ_2 有绝对值较大的负值时,生物量谱类似于对数尺度区间内的经验生物量谱。

根据所给出的确定性模型,不同的目标函数,在很大程度上是有关联的(Jorgensen, 1997)。在动态的生态系统模式中,生态限制条件的表达是可以相对简化的,是由环境条件和机体之间的关系来确定的。在详细的生态过程往往被消去的一般模式中,生态系统水平的生态限制条件是更复杂的。关于生态系统的大小结构, Han 用丰度大小的最优离散所定义的目标函数最优化的方法讨论了生物量谱密度和丰度谱密度的可能分布问题。所提出的四种模式中的每一个模式,都只能配合某些数据,而不能配合一切数据。因此,需要进一步研究生态系统组织的目标函数和某些比较合理的限制条件更具有普遍性的表达方式。

3. 动物生长优化控制的现实方法

有了生物量和丰度对身体大小依赖关系的研究结果,为以人工生态动力源控制各种动物的合理增长提供了较可靠的理论基础。但要真正实施动态增长的优化控制,还需建

立必要的新概念,研究调节体重、体型的优化策略。

(1)基本定义

参照《生态动力学》中一年生植物(主要是农作物)生态产量的概念来定义动物(主要是家畜、家禽和水生动物,也包括昆虫的成虫)问题中的生态重量、生态增重量和生态增重率、相对生态增重率及二次生态增重率的概念。

定义 I 生态重量 W_e 及相关定义

我们将动物各个发育阶段的实际重量 W_e 分为三个组成部分——基因重量 W_g 、生态重量 W_e 和随机噪声重量 W_r 。其中的 W_g 是由动物遗传基因决定的,即由种子生态动力源所能左右的那部分实际重量,可由育种者提供的资料进行评价,生态重量 W_e 则是将动物视为生态动力汇、由各种生态动力源因子综合作用所形成的那部分重量,是排除了随机噪声作用和遗传基因作用的重量。随机噪声重量 W_r 是由非遗传基因、非生态动力而由社会因素、管理因素促成的重量。

定义 II 生态增重量 dW_e 或 ΔW_e

生态增重量 dW_e (连续情形)或 ΔW_e (离散情形)是只因生态动力源变化促成的生态重量的增值,比如以每日增重来测量($g \cdot d^{-1}$),对于这种离散条件,在第 n 天动物的重量是 W_{en} ,第 $n+1$ 天是 $W_{e(n+1)}$ 那么

$$\Delta W_e = W_{e(n+1)} - W_{en}$$

即为增重量的一个差分表达式。 ΔW_e 为正值,表示生态重量增加; ΔW_e 为负值,表示生态重量减少,即重量负增长。

定义 III 生态增重率

生态增重率 R 是生态增重量随时间变化的速率。用数学语言表述之,即 R 是生态增重量对时间的微商,在离散情形下即对时间差商。于是可写出定义式

$$R = \frac{dW_e}{dt}$$

或

$$R = \frac{\Delta W_e}{\Delta t}$$

定义 IV 相对生态增重率 R_r

在某一生育阶段内动物都有一个最理想的即最宜生态增重率。如果为了肉食产量的目的,此即最大生态增重率。我们把动物在某一发育阶段的实际生态增重率 R_s 对该阶段最宜生态增重率 R_{opt} 的比率称为相对生态增重率 R_r ,其定义式可以写成

$$R_r = \frac{R_s}{R_{opt}}$$

定义 V 二次生态增重率 R_s

生态增重量对时间的二次微商,我们称之为二次生态增重率,其定义式可以写为

$$R_s = \frac{d^2 W_e}{dt^2}$$

有了上述的五个定义及相应的定义式,必要时,很容易依据它们相互联系的机理,建立并表达出它们的相应关系。

(2) 生态增重量的确定

在现有研究水平下,用确定性的数学方法和称重方法来准确地给出生态重量、遗传基因重量和随机噪声重量三者的准确比例,还是不可能的。因为在现有生物学和计量学水平下,还没有办法称量,只能测定各时刻的动物体总重量。但是我们可以仿照生态产量推测方法,用趋势法、正交多项式法和滑动平均法等求出生态增重量序列。具体论述这一方法的书籍和论文很多(Yu Ximin, 1988; Yu Ximin, 1985; 裴铁璠等, 2001),读者可自行参阅。

(3) 生态增重量的最优控制决策

依据不同的目标,控制生态增重量及相应的比率,是动物生态控制研究的根本目的。为了提高肉用家畜或野生动物的产肉量,则需要以提高增重率为目标,比如让肉鸡早日出栏,提高生产效率,但对于有些动物,则不是单纯追求肉的重量,而要求体重与身高(体长)协调,太肥了尚须减肥,这就要根据所要求的比例关系,进行饲料、食物、饮水、环境等营养或水文气象生态动力源调节。如对于许多象类种群来说,象的体重 W 与身長 L 有如下关系:

$$\frac{dW}{dL} = 3 \frac{W}{L}$$

由微积分公式可求得其函数关系是 $W = CL^3$ 。对不同象类,只要知道或设法求得 C ,就能得出其间的具体数值关系。

如何按正常的需求,定量地控制动物(包括人)体重与身高关系呢?要求找一个很准确的结论并且是普适的,那当然很困难。比如,在医学和生理学上已知身高和体重关系。如果比例失调,如身高 1.70 m 的人,体重为 100 kg,显然是过重了,即人们所说的“胖子”。对于许多动物,也有类似的情况。要使成型的动物的重量和长度比例合适,待其长成后再行控制似乎为时过晚,而基因,外界干扰又不是人为能随时左右的,就哺乳动物来说,先天基因条件是已定型的,所以优化控制体重与身長(高)比例,须从生态动力要素考虑,分阶段采取措施。

在许多方面有所应用的 Марков 规划决策的有限阶段模型,用于这类问题,是目前最为合适的随机数学方法。从过去我们在不同场合多次提到的原理和应用来说,该模型是不难应用和计算的。由于实际数据的缺乏,对于动物分阶段的观察和估测是很重要的,一方面测定增重量等动态,另一方面,从机理上考虑几种行动措施,比如身体的运动、环境温度是否适应(冷应激,热应激)、水分状况、食物供给的量和品种(考虑营养比例,微量元素含量等)以及其他人为措施。有了状态、行动和相应报酬的资料,就可以算出有关的转移概率,制作表格(具体详见本书第八章第三节),这样可以分阶段达到平时赋予合适条件,达到最终优化控制的目标。

第五节 相对闭合生物环境的生态控制

为使各种生物充分利用优越生态环境,避免生态逆境,随着技术科学的发展,人们设计多种相对封闭的生物环境。这一节我们用确定型模式阐述温室、畜(禽)舍以及人居环境的相应控制原理。

一、温室控制的数值模拟

温室主要用于植物栽培,也用作动物、微生物环境。掌握其机理,是优化调控的基础。

1. 模造过程

温室被视为四层系统:覆盖物(生态动力传输媒介)、空气(气象生态动力源之载体)、作物(生态动力汇)和土壤(土壤生态动力源载体)。假定每种系统都是均匀的。

(1) 覆盖物温度

经由覆盖物外表面、内表面的能量通量分别是

$$q_{\text{外}} = h_f(T_e - T_{\alpha}) + (S_o - S_e) + (L_{\alpha} - L_{\alpha c}) \quad (5-92)$$

$$q_{\text{内}} = h_s(T_{ic} - T_a) + (S_d - S_u) + (L_{dc} - L_{uc}) - \frac{\lambda \rho}{r_w}(\omega - \omega_{sc}) \quad (5-93)$$

在方程(5-92)中, $q_{\text{外}}$ 是每分钟时间每单位覆盖物面积的热流量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), h_f 是从覆盖物到外界空气的热量传递系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), T_e 是外界空气的温度(K), T_{α} 是覆盖物外表面温度(K), S_o 是太阳入射辐射通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), S_e 是温室外表面太阳入射辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), L_{α} 是自覆盖物向下热辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), $L_{\alpha c}$ 是自覆盖物向上热辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。在方程(5-93)中, h_s 是自覆盖物至内部空气的热量传递系数, T_{ic} 和 T_a 分别是覆盖物内面积和内部空气温度(K), S_d 是自覆盖物向下的太阳辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), S_u 是到覆盖物的太阳辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), L_{dc} 是自覆盖物向下的热辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), L_{uc} 是到覆盖物的向上热辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), λ 是水的蒸发潜热($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ 是空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ω 是内部空气的比湿、 ω_{sc} 是在温度 T_{ic} 时的饱和比湿, r_w 是覆盖物的空气动力阻抗($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)。

经由覆盖物传导而传递的热量是:

$$q_{\text{导}} = \frac{k_c(T_{\alpha} - T_{ic})}{\delta} \quad (5-94)$$

式中, k_c 是覆盖物的热传导率($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), δ 是覆盖物厚度(m)。

(2) 内部空气温度

热平衡(每单位地面面积)是

$$h_s(T_{ic} - T_a) \frac{A_c}{A_b} + h_i(T_s - T_a) + 2h_p(T_p - T_a) \frac{A_v L_{ai}}{A_b} + h_v(T_e - T_a) + \frac{Q_c}{A_b} - \frac{\lambda S_p}{60 A_b} = 0 \quad (5-95)$$

式中, A_c 是覆盖物表面积(m^2), A_b 是温室地面面积(m^2), h_i 是自地面至内部空气的热传递系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), T_s 是温室土壤温度(K), h_p 是自植物至空气的热传递系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), T_p 是植物叶温(K), A_v 是植物所覆盖的地面面积(m^2), L_{ai} 是叶面积指数(每单位地面面积上的叶的面积), h_v 是通风热传递系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), Q_c 是来自加热器的对流能量(W), S_p 是喷雾速率($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$)。

(3) 内部空气湿度

土壤和空气之间的水分交换对内部空气湿度有重要影响,因此,每单位地面的质量平衡是

$$\frac{2\rho A_v L_{ai}[\omega_{sp} - \omega]}{A_b(r_a + r_s)} + \frac{\rho A_c(\omega_{sc} - \omega)}{A_b r_w} + \frac{\rho(\omega_{ss} - \omega)}{r_{sc}} + \frac{h_v(\omega_e - \omega)}{c_p} + \frac{S}{60 A_b} = 0 \quad (5-96)$$

式中, ω_{sp} 是温度 T_p 条件下的饱和比湿, r_a 是植物的空气动力阻抗 ($s \cdot m^{-1}$), r_s 是作物的气孔阻抗 ($s \cdot m^{-1}$), ω_{ss} 是温度 T_s 条件下的饱和比湿, r_{sc} 是温室地面的空气动力阻抗 ($s \cdot m^{-1}$), ω_e 是外界空气的比湿, c_p 是空气的比热 ($J \cdot kg^{-2}, K^{-1}$)。

(4) 植物温度

就当地的某些作物来说, 植物热容量与土壤活动层相应值有同样数量级, 因此对于这样一些作物中的热存储作用, 应当考虑。

在这里, 每单位叶面积的平衡方程是

$$2h_p(T_a - T_p) + \frac{L_{dp} + L_{us} - L_{up} - L_{ds}}{L_{ai}} + \frac{S_d + S_{su} - S_u - S_{sd}}{L_{ai}} + \frac{Q_r \eta_p A_v}{L_{ai} A_b} - \frac{2\lambda\rho(\omega_{sp} - \omega)}{r_a + r_s} = \frac{V_v \rho_v C_v}{A_v} \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (5-97)$$

这里 L_{dp} 和 L_{ds} 分别表示到植物和到地面的向下热辐射, L_{us} 和 L_{up} 分别表示来自地面和来自植物的向上热辐射 ($W \cdot m^{-2}$)。 S_{su} 是自地面向上的太阳辐射, S_{sd} 是到地面的太阳辐射; Q_r 是自加热器每单位表面面积辐射的能量 ($W \cdot m^{-2}$), η_p 是自辐射加热器至植物的视因子, V_v 是植物的体积 (m^3), ρ_v 植物的密度 ($kg \cdot m^{-3}$), C_v 是植物的比热 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), t 是时间 (s)。

(5) 土壤温度

因为土壤的能量存储是重要的, 所以把热传导的微分方程包括于其中

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5-98)$$

这里 T 是土壤温度 (K), α_s 是土壤的热扩散率 ($m^2 \cdot s^{-1}$), x 是到地面的垂直坐标深度 (m)。

土壤-空气界面的边界条件包括蒸发过程的能量

$$(L_{ds} - L_{us}) + (S_{sd} - S_{su}) + Q_r \eta_s \left(1 - \frac{A_v}{A_b}\right) + h_i(T_a - T_s) + \frac{\lambda\rho(\omega - \omega_{ss})}{r_{sc}} = -k_s \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5-99)$$

这里, η_s 是自辐射加热器到土壤的视因子, k_s 是地面的传导率。

2. 求解与验证

为了求解上述的一系列方程, 首先必须就每个时间步长计算初始条件(太阳辐射, 风速, 外界空气的温湿度)和系统参数(通风率, 土壤和植物性质等), 可用迭代法求解。并将模拟计算结果同实测结果作比较。

3. 结果应用

模拟结果给出在一定面积下温室调控指标。如 Levit 等在阿根廷就栽培草莓的温室所作模拟试验和计算结果表明: 在冬季最寒冷的月份, 一个月内, 热功率为 33 kW, 加热器利用时数为 232h, 加热器利用日数为 24 d。对于其他月份, 也给出相应指标, 这些指标, 是对温室进行优化控制的基本依据, 但不是绝对不变的依据。

温室属于局地性的相对封闭的生物生存环境。所以, 在对温室控制技术进行推广时, 因地制宜十分必要。历史上的经验教训也说明了这一点。大约在 30 多年前, 东北南部一些地区的园艺技术人员, 曾南下、北上学习外地温室蔬菜栽培经验。由于只注意温

室小气候环境,只注意温室的封闭性,而未注意温室所在地的大气候差异(东北南部比河北冷,比黑龙江暖),以致生搬硬套外地“经验”,使所建温室耗能大,室内温度却不高,导致生产力低下,以致农民认为“建温室,只能赔本”。这样,使得本来合适的外界气候资源被浪费掉。这正是没有合理控制和培育生物的生态环境所酿成的后果,也是生态控制的一次失误。

在 20 世纪 80 年代,随着包括温室环境优化理论与技术在内的生态控制原理研究的深入,逐渐扭转了上述局面。其根本经验在于:充分认识到霜期农业气候资源的客观存在性,而不是一提到自然资源只限于土地、生物等看得见摸得着的固体实物,也不限于无霜期的气候资源了,尤其充分利用一级生态动力源——太阳辐射,显得重要。在对待地域差异上,明确了小气候寓于大气候之中,这一符合辩证法规律的客观实在,以致在实践中,为实现相对封闭环境的优化生境时,必须充分考虑温室与外界交换的性质;在对待时域差异时,充分重视天气和气候的差异,不可将在气候一般年份得出的规律,不加分析地用于某年份的不同天气条件之下。

我国大面积的日光温室群的形成已有几年的历史,现在面临的是进一步巩固发展。为此,从生态控制原理上,尤其从理论上考虑改进的设计方案,是十分必要的。尽管要因地制宜,但温室设计的基本方程是带有一定普遍性的,前面所述的一系列方程,是改进设计中必须考虑的基本依据。比如,在设计时根据外界温度高低决定用什么样的覆盖材料,如用无滴膜,是用单层,还是用双层;根据内外气温差和风力,确定放风孔的大小和位置、方位;根据土壤温度状况,确定地面之下酿热物(如马粪层)厚度、确定是否用地热电热器或回烟炕;根据室内作物所需温度湿度指标确定通风时间和通风量等。这些措施是人为控制的,但要使控制得力,既节省能源又益于作物生产,就必须用方程作模拟计算验证,在基本原理不变条件下,对方程要作必要改进,输入参数。由于我国农村基层技术单位的计算设备条件好转,所以只要通过培训等方式培养出能做这样工作的人,优化控制温室的目标是容易实现的。

二、畜(禽)舍生态环境的人工控制:强制换气系统

畜(禽)环境是影响畜(禽)生长发育、反应的生态条件,包括许多非生物与生物的、自然的和人工的生态动力因子。其中热力的和空气动力的因子对畜(禽)产品的产量、质量有较大影响。由于畜(禽)极力保持稳定的体温,需要尽量平衡的热量交换,所以仅在有限的温度范围内才能生存。如果空气环境不适合,畜(禽)容易生病。热力环境包括气温、湿度、辐射、风速;空气环境包括有害气体、空气中的微粒、微生物和臭气。绝热强制换气系统在舍饲畜(禽)环境控制中是有用的系统。下面就其应用的几个主要问题作简要论述。

1. 绝热强制换气原理

热环境,用生物实验来选择其标准。依生态动力源来确定混浊空气,尤其是其中 CO_2 环境。首先关于空气环境,须注意所含化学物质的污染。畜(禽)舍中所产生的最重要的气体有二氧化碳、氨气及亚硫化氢等。其中的 CO_2 被选作空气环境指标;生长中和催肥中的动物, CO_2 含量控制在 0.3%,乳用、繁殖的控制 0.2%。其次,确定最小换气率 V_e ,主要依据 CO_2 浓度,其方程是

$$V_e = 4.5 \times 10^{-8} Q_{NP} [100 / (C_{SL} - 0.034)]$$

式中, 4.5×10^{-8} 是个常数, 表示畜(禽)放出单位热量所产生的 CO_2 ; Q_{NP} 为畜(禽)所放出的热量(W); C_{SL} 为设计的 CO_2 浓度(%)。第三, 按绝热标准调节温度换气率和最小换气率, 当舍外气温高于动物所需气温时, 家畜(禽)所生显热要适应内部温度, 换气的目的是从舍内除去热量以保持设定的温度。依舍内外温差(3~10 K)用热平衡方法调节温度, 确定换气量。

2. 太阳能利用原理

太阳辐射能属于一级生态动力源为生物环境提供的能源, 它能源源不断地供给生物, 不用钱购买, 无污染。

当然, 为利用这种能源, 要支付设备及其安装费用。当太阳能加热系统与绝热、强制换气系统结合应用时, 能起到有效的温度调节作用。利用太阳能的设备有: 太阳聚热器、热水贮存池、辅助加热器、水泵和控制器。在任何太阳加热设备中, 收集太阳能的热量的面积、贮存容量都是主要的设计参数。

3. 育肥猪舍的环境控制

片山研究了两种不同猪舍系统的热力环境、空气环境和生产率。试验猪舍设有绝热和强制换气系统; 对照猪舍系开放型、自然换气的。结果表明:

①舍内温度: 在冬季, 试验比对照高 7°C ; 在夏季, 差异不大。

②墙面辐射温度: 冬季, 试验比对照高些; 夏季, 试验畜舍中平均辐射温度和向量辐射温度比对照低些。

③换气率: 试验条件下冬季日均为 $0.608 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 夏季 $11.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

④空气中物质含量: 在冬季, 试验条件下 CO_2 和 NH_3 含量比对照高些, 夏季无显著差异。这是由换气量不同引起的。

⑤生态增重: 7~8月日平均增长比对照高 $0.112 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

以上结果表明, 绝热强制换气起到优化猪舍环境的作用, 从而有利增长。

4. 乳牛舍环境控制

冬季舍内平均气温保持在 7.3°C , 且分布均匀, 舍内总显热由乳牛产生。在冬季, CO_2 和 NH_3 的浓度分别小于 0.2% 和 $4 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$; CO_2 生产率是每 500 kg 体重 $4.51 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。在夏季, CO_2 和 NH_3 的浓度分别小于 0.1% 和 $10 \times 10^{-6} \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$, CO_2 水平分布均匀。上述结果表明: 绝热和强制换气系统为乳牛提供了良好的生态环境, 设计控制系统应充分考虑作为生态动力源的乳牛所产生的热量和 CO_2 。

5. 孵雏鸡舍的环境控制

对试验孵雏鸡舍, 观察内部空气流动, 保持空气混合良好, 分布均匀, 宜于孵化的地面风速为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。太阳增热装置也为鸡舍提供大量热能。

三、人居环境调控

当自然条件不能满足人或其他生物的需求时, 人们总是尽可能为生物创造其适宜的生存环境, 这实质上是人工调节自然生态动力源的生态控制过程。这种想法, 由来已久, 其实人的住房的建设, 也是这种想法的实施过程之一。在现代, 随着人类生活水平提高, 建筑设计者对环境越来越重视。随着各种生物技术的发展, 人们为植物栽培、动物生存

创造了越来越合适的生存环境。这样的生态环境优化控制,涉及的领域是多方面的,涉及的学科也是很多的。因而,从生态控制角度的研究工作也渗透于许多学科研究领域,本节专门论述用机理和确定型模式所作研究的几个方面,并统一地从人工生态动力控制的方法论上加以认识。

1. 室内空气质量控制

在室内空调安装上,须考虑当地空气速度,因为室内生态环境要素的控制,受外界自然生态动力源要素的影响,居住环境中空气流动速度的上限和下限,是就不同的通风标准确定的,其值不应太高也不应太低。在比较寒冷的国家和地区,要求在时间 t (以 s 为单位)的空气速率 $V(t)$ (以 $m \cdot s^{-1}$ 为单位)较低。

2. 空气湍流

在热带气候条件下,MVAC(机械通风与空调系统)设计的目标是:为人们提供较低的室内气温和较高的平均空气速率。空气湍流因子是必须考虑的。为提高该因子质量,湍流强度 T_u (以百分率为单位)的定义式写为

$$T_u = \frac{u'}{u} \quad (5-100)$$

式中, u 是空气平均速率, u' 是平均速度振动,而

$$u = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_0+t_1} V(t) dt \quad (5-101)$$

t_0 和 $t_0 + t$ 分别为时间的起止限。并有

$$(u')^2 = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t_1} [V(t) - u]^2 dt \quad (5-102)$$

使室内湍流强度 T_u 维持一个适当的值,即使在温度较高,空气速度较低时也会给出同样的舒适度水平。在确定湍流之舒适度范围前,对上述现象须作详细研究。与各种不同室内空间有关的野外测量和热力舒适度评价,是应当做的。以设计为目的的宏观参数,必须用湍流理论加以研究。

3. 热力舒适度

一个叫做 PD (不满意百分率)的参数 (Hanzawa 等, 1987; Melikov, 1987),用以评价热力舒适度,它是依据 u , T_u 和空气温度 T_a 计算的

$$PD = (3.143 + 0.3696uT_u)(34 - T_a)(u - 0.05)^{0.6223} \quad (5-103)$$

在方程 (5-103) 中, u 如果小于 $0.05 m \cdot s^{-1}$ 取作 0.05 ; PD 如果大于 100% , 取作 100% 。

参数 PLC (Chou *et al.*, 1994), PD 取值依赖于经验确定的临界气温 θ_1 和 θ_2 , 其公式是

$$PLC = \begin{cases} -PD & T_a = \theta_1 \\ f(T_a) \cdot PD & \theta_2 \leq T_a \leq \theta_1 \\ +PD & T_a < \theta_2 \end{cases} \quad (5-104)$$

函数 $f(T_a)$ 的表达式是

$$f(T_a) = \frac{2(T_a - \theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} - 1 \quad (5-105)$$

有了类似以上公式的调节参数计算方法,可以依据不同的环境在不同气候条件下,

进行合理的空调控制。

第六节 工业废热与土壤及近地面空气生态动力源控制模型

大型发电厂(核电厂、热电厂等)以及其他类似的工厂,总有大量的废热释放于土壤和近地面大气环境之中,造成环境污染。这样的热废气污染实际上构成一种有关生物的有害的生态动力源,对环境中的各种植物、动物和微生物的生长、发育、产量形成和产品质量必然起到负生态动力作用,我们研究这样的生态动力源、汇关系,找出改变原有的自然形成的生态动力负效应,设计出生态动力正效应的控制方案,显然是十分有意义的举措。因为由工厂释放出来的大量的热量被用于农业(主要是园艺),能够把自然形成的不利生态动力效应通过科学的生态控制方案转化为有利生态动力效应。受益者首先是园艺作物这样的生态动力汇。

这种被转化来的生态动力源是经由物理机制而获得的。事实上,在此转化过程中,乃是通过人工调节使废热被用于加热上层土壤和近地面的空气,即同时改变了土壤类和气象类生态动力源。为研讨这一问题,当然必须根据物理学的原理来分析所论对象,以便建立起确定型的数学模型。

一、模构过程

假定一组长管(管的半径为 r)被埋在深度为 d 的土壤中,其横向影响距离为 L 。管中的热水的常定温度为 T_w 。

控制所研究的土壤层中温度分布 $T_g = T_g(x, z, t)$ ——作为时间、空间的一个函数——的扩散方程是

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = K_g \nabla^2 T_g \quad (5-106)$$

为了求解方程(5-106),我们须确定土壤热扩散率 K_g ,并假定各个管中的水温都是一样的。对于求解析解来说,应当以温度不随土层深度变化为前提条件,为求点相对密度较大的网格上的二维数值解,确定深度 D 不应太深,以便于数值计算。

设 D_d 为阻尼深度(damping depth),那么我们可以写出

$$D_d = \left(\frac{2K_g}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-107)$$

式中, ω 表示温度周期变化的频率。对于大多数类型的土壤来说, D_d 在 10cm 和 25cm 之间,而 D 选为 2cm(详见 Rakovec, 1988)。

上边界条件——土壤表面温度——作为土壤表面能量平衡的一个函数,加以计算,它显示出日变化和年变化的周期性。

为了求解方程(5-106),我们可以用有限差分方法,对网格点上的一切有关条件都要结合起来加以研究。用这一方法,需要适当地选择时间步长 Δt , 这里的 Δt 关系到 Δx (沿水平方向网格点之间的距离)和 Δz (沿垂直方向网格点之间的距离)。如果一个明确的数值方案被采用,那么必须服从稳定性。

1. 土壤表面温度

土壤表面温度 $T_s(x, t) = T_g(x, 0, t)$ 的变化是近地面大气和 $z=0$ 高度土壤中热通

量辐散的结果。如果土壤表面的一个薄层 δ 的能量通量,不是处于平衡状态的,那么可以假设该层的平均温度等于地面温度(即土壤表面温度) T_s ,于是我们有:

$$C_g \delta \frac{\partial T_s}{\partial t} = j_s + j_l + j_H + j_{LE} + j_g \quad (5-108)$$

式中, C_g 是土壤的容积热容量, j_s 是到一个水平面的短波辐射通量密度, j_l 是到(或自)一个水平面的长波辐射通量密度, j_H 是沿水平方向的显热通量密度, j_{LE} 是沿垂直方向潜热通量密度, j_g 是沿垂直方向的土壤热通量密度。

方程(5-108)等号右边的前两项,是通过试验估计出来的。

显热通量密度 j_H 是以如下的条件为基础进行计算的,即使只有微风,新的边界也从加热区的边界向外传播。据研究(Rakovec, 1987),这个新边界高度应取为 $h = 10\text{m}$ 。在这个高度 h 之上,接近地面的大气不受土壤加热作用的影响,因而,对于该高度上的空气温度和风的气候数据,都是不需要订正的。就那个高度和土壤表面之间的层次来说,我们有温差 $T(h) - T(0)$ 的数据和风速 $u(h)$ 的数据,即可用它们通过容积值估计 Richardson 数:

$$R_B = \left(\frac{g}{T_0} \right) \left(\frac{T(h) - T(0)}{u(h)^2} \right) h \quad (5-109)$$

因为显热通量密度可以表达为

$$j_H = -\rho_p u^* \theta^* \quad (5-110)$$

温度 ϕ_H 、风速 ϕ_M 条件下的实验廓线可以表示为

$$u^* = k \left(\frac{u(h)}{\phi_M(R_B)} \right) \quad (5-111)$$

$$\theta^* = K \left(\frac{T(h) - T(0)}{\phi_H(R_B)} \right) \quad (5-112)$$

土壤热通量密度,取决于土壤热传导率 λ_g 和温度梯度。其中 λ_g 主要取决于土壤水分含量 x_g 。

2. 土壤热扩散率

关于土壤温度的气候信息不仅能够用作初始条件和边界条件,而且也能用于确定土壤温度扩散率 K_g 。利用土壤表面温度日变程的正弦变化规律,可以给出如下的解析解

$$T_g(z, t) = \bar{T} + A_0 \exp(-2/D_d) \sin(\omega t - z/D_d) \quad (5-113)$$

式中, ω 是日周期的频率, $\omega = 2\pi/(24\text{h})$, \bar{T} 是在深层(本列中的 D)位置的常定温度,而阻尼深度 D_d 关系到 K_g (见方程(5-107))。

根据所测定的在不同深度 Δz 的位相迟滞 Δt ,可以得出按如下公式表述的扩散率 K_t 的估计值

$$\omega \Delta t = \frac{\Delta z}{D_d} \rightarrow K_t = \frac{1}{2\omega} \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \right)^2 \quad (5-114)$$

随着深度的增加,温度的振幅减小,这一土壤温度波动方程能够准确表达为大量观测数据所证实的事实规律,也为估计温度扩散率提供了可能性,当然也有一定的误差。振幅 A 减小因子,也依赖 K_g ,即

$$A_{(z)} = A_0 \exp\left(-\frac{z}{D_d}\right) \rightarrow K_A$$

$$= \frac{\omega}{2} \left\{ \frac{\Delta z}{\ln[A(z)/A(z + \Delta z)]} \right\}^2 \quad (5-115)$$

二、进一步的研究与应用前景

本例所论模型,从本质上说,是以物理基础为依据的气象生态动力源与土壤生态动力源的综合控制模式。由于所讨论的大气边界层的最下层,尤其是近地面层的物理过程和土壤最上层的物理过程,都是以相应的原理为基础并用机理较明确的确定型数学模型表达的,所以这样的研究方向应予坚持。进一步的研究工作,须加深对生态动力汇即需要热量的生物的机制研究,从原则上说,那是可以做到的。因为从生理、生化、生态角度,可以考虑现在已有各自的生物物理机制的确定型数学控制模型,当然这样的两方面的结合研究,需要做更复杂的试验,需要先进的设备,尤其需要建立更合理的数学模型。

这里所述的模型,应用前景是广阔的。尤其是在我国,一方面农业生产发展,需要更多的来自各方面的热量,另一方面,许多工业部门排出的废热的量是很可观的。在工厂化农业正在发展的今天,实施这种工农业结合式的优化生态控制,尤其必要。

参 考 文 献

- 千知觉、王定江. 2001. 非线性森林发展系统的渐近性. 应用泛函分析学报, 3:87~91.
- 方宗义、朱福康、江吉喜、钱正安. 1997. 中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社.
- 朱廷耀、关德新、周广胜、金昌杰. 2001. 农田防护林生态工程学. 北京:中国林业出版社.
- 吴承祯等. 2001. 柳杉—杉木林混交林种间竞争的研究. 生物数学学报, 16:247~251.
- 张 翼. 1992. 农田林网中风速分布的数值模拟. 北京:气象出版社.
- 陈 阜. 1998. 农业生态学教程. 北京:气象出版社.
- 金善宝. 1995. 中国小麦学. 北京:中国农业出版社.
- 洪 伟等. 1995. 杉木人工林经营过程最优控制研究. 福建林学院学报, 15:123~128.
- 洪 伟. 1999. 马尾松人工林经营模式及其应用. 北京:中国林业出版社.
- 周义仓等. 1999. 数学建模实验. 西安:西安交通大学出版社.
- 姜启源. 1993. 数学模型. 北京:人民教育出版社.
- 蒋云良. 2001. 基于同异反态势排序的学生成绩分析. 数理统计与管理, 20:26~29.
- Brans, S. J., Lucas, W. F. and Straffin, P. D. 1983. *Political and Related Models*. New York: McGraw-Hill.
- Chamow, E. L. 1977. Trade-off-invariant rule for evolutionarily stable life histories. *Nature*, 287: 393~394.
- Chow, W. K. 2001. On managing indoor air quality in Hong Kong. *Journal of Environmental System*, 28: 271~277.
- Chow, W. K. et al. 1994. Investigation of the subjective response to elevated air velocities: climate chamber experiments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 20: 187~192.
- Cui, J. and Chen, L. 1998. The effect of dispersal on the time varying Logistic Population growth. *Computer Mathematics Applications*, 36: 1~9.
- Gallagher, K. et al. 1994. Genetic algorithms: a powerful tool for large-scale nonlinear optimization problems. *Comput Geosci - UK*, 20: 1229~1236.
- Han, B. P. et al. 2001. Size dependence of biomass spectra and abundance spectra: the optimal distribu-

- tion. *Ecological Modelling*, **145**: 175~187.
- Hanzawa, H. *et al.* 1987. Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces. *AS HRAE Transactions*, **93**: 524~539.
- Harshbarger, R. J. 1993. *Calculus with Applications* (2nd ed.). Toronto: D. C. Heathand Company.
- Harwell, M. A. 1998. Science and Environmental decision making in south Florida. *Ecological Applications*, **8**: 580~590.
- Huang, J. *et al.* 1998. Weak complementarity and production. *Economic Letters*, **60**: 329~333.
- Iwasa, Y. and Cohen, D. 1986. Optimal growth schedule of a perennial plant. *Am. Nat.*, **133**: 480~505.
- Jorgensen, S. E. 1997. *Integration of Ecosystem Theories: A pattern Revised* (2nd ed.). Dordrecht: Kluwer.
- Koening, W. D. *et al.* 1999. Sex - ratio selection in species with helpers at the nest: repayment model revisited. *Am. Nat.*, **153**: 124~130.
- Kokko, H. *et al.* 1996. Evolutional optimality of delayed breeding in voles. *Oikos*, **77**: 173~175.
- Kokko, H. *et al.* 2000. Breeding suppression and predator - prey dynamics. *Ecology*, **81**: 252~260.
- Komdeur, J. 1992. Importance of habitat saturation and territory quality for evolution of cooperative breeding in the Seychelles warbler. *Nature*, **358**: 493~495.
- Korentajer, L. and Berliner, P. R. 1988. The effects of moisture stress on nitrogen fertilizer response in dryland wheat. *Agronomy Journal*, **80**: 977~981.
- Korentajer, L., Berliner, P. R., Dijkhuis, and Yanzyl, L. 1989. Use of climatic data for estimating nitrogen fertilizer requirements of dryland wheat. *Journal of Agricultural Science*, **113**: 131~137.
- Levit, H. J. *et al.* 1988. Energy budget for greenhouse in humid - temperate climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, **42**: 241~254.
- Loiselle, S. A. *et al.* 2000. Feedback analysis in reserve management: studying local myths using qualitative models. *Ecological modelling*, **129**: 25~37.
- Loiselle, S. *et al.* 2001. Qualitative modeling tools for rural ecosystem management. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, **8**: 1~14.
- Mahychariyawong, T. 2001. Modeling sustainable water quality improvement using water hyacinth and its application in Thailand. *International Journal of Sustainable Development and World ecology*, **8**: 221~231.
- Melikov, A. K. 1987. Quantifying draught risk. *Brueland Kjaer Technical Review*, No2.
- Pattanayak, S. K. 2001. Worth of watersheds: a producer surplus approach for valuing drought mitigation in Eastern Indonesia. *Environment and Development Economics*, **6**: 123~146.
- Pen, I. *et al.* 1999. Seasonal sex ratio trend in the European kestrel: an ESS analysis. *Am. Nat.*, **153**: 384~397.
- Pen, I. 2000. Sex - ratio optimization with helpers at the nest. *Proc. R. Soc. Lond. B*, **267**: 539~543.
- Puccia, C. J. *et al.* 1985. *Qualitative Models of Complex System*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Sattenspiel, L. 1996. *Spatial Heterogeneity and Spread of Infectious Human Diseases*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, V. H., Tilman, G.D. and Necola, J. C. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, **100**: 179~196.
- Sondia - Mago, A. 1994. Venezuela: malariay movilidad humana estacional de Las comunidades indigenas del rio ricito del esado Apure. *Fermentum*, **3/4**: 102~123.

- Tanner felat, M. *et al.* 1998. Fluctuating resources and the evolution of litter size in the arctic fox. *Oikos*, **83**: 545~559.
- Torres – Sorando, L. *et al.* 1997. Models of spatio – temporal dynamics in malaria. *Ecological Modelling*, **104**: 231~240.
- Van Wijk, M. T. *et al.* 2001. Towards understanding tree root profiles: Simulating hydrologically Optimal strategies for root distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, **5**: 629~644.
- Van Wijk, M. T. *et al.* 2000. Analyzing latent heat fluxes of coniferous forests with fuzzy logic. *Water Resour. Res.*, **36**: 1865~1872.
- Vidondo, B. *et al.* 1997. Some aspects of the analysis of biomass sire spectra in aquatic. *Ecology. Limol. Oceanogy*, **42**: 184~192.
- Vossen, P. 1990. Comparative statistical validation of two ten – day water – use models and of three yield – reduction hypotheses of yield assessment in Botswana. *Agricultural and Forest Meteorology*, **51**: 177~195.
- Wang, D. J. 1994. A nonlinear forest evolution equation. *Systems Sciences and Systems Engineering*, **3**: 312~319.
- Yamamara, K. 1997. Optimality in the spatial leaf distribution of the weed *Portulaca oleracea* L. . *Ecological Modelling*, **104**: 133~143.
- Yu, Ximin *et al.* 1985. Forecasting the distribution of meteorological yield of crop using the Chebyshev polynomial. *Agricultural and Forest Meteorology*, **34**:323~332.
- Yu, Ximin *et al.* 1988. Monte Carlo method of risk analysis of meteorological damage affecting the maize crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, **43**:183~191.
- Минорский, В. П. 1987. *Сборник Задач по Высшей Математике*. Москва: Наука.
- Шиачев, В. С. 1985. *Высшая Математика*. Москва: Высшая Школа.

第六章 随机型生态控制

由于生态控制中有许多随机因素,有许多偶然问题,因此不能用确定性模型表达。在数学中说明偶然事件必然规律的概率论及其应用,是生态控制常用的数学工具。具有时间性的随机问题叫随机过程,也属于广义的概率论的范畴。本章从各种随机试验获取数据到建立统计模型来讲述随机过程生态控制问题。在试验设计中则重点介绍均匀设计在生态控制中应用的问题。最后一节讲述我国赵克勤提出的一种新的数学方法——集对分析——在生态控制中的应用。

第一节 试验统计的生态控制模式

在生态控制的实践和原理创建中,要寻求受控对象和控制者关系及一系列有关指标时,所遇到的除确定性关系之外,尚有大量的随机型的问题。解决这些问题的方法,前者主要是确定性方程的模型,有许多时候,采用微分方程。而后者主要是寻找偶然事件的必然规律,所用的数学原理基础是概率论。数理统计可以说是概率论的一种主要应用。由于生态控制实践中,经常遇到数理统计问题,所以这种数学方法是广大生态工作者所熟悉的。自 Pearson 以来,经由 Fisher, Cramer, Колмогоров 直至今日,数理统计这门学科用得越来越广,越来越深入。我国著名统计数学家许宝騄院士(1910—1970)著有《抽样论》,抽样的思想方法,不但今天要用,以后也要用,在生态控制中有重要作用。因为对人们面临如此广泛的生态控制中的随机问题,无论是谁也不可能事必躬亲,而只能找出典型的信息资料加以研究。本书第三章所述的生态控制的多种信息源中的资料,实际上都可用统计方法加以分析、综合。我们觉得,统计中常用的调查,当然属于有用的资料获取手段,但生态控制资料的取得,完全不限于一般的调查,而主要是靠试验得出的资料,包括常规资料。所谓常规资料,在设计观测之初衷,原本未考虑在生态控制中有用,生态控制者今天认识到自己也是许多水文、气象、遥感、生物物候等常规资料的用户之一。看来,这些逾百年至少延续几十年的资料,客观上也是一种试验资料,因为取之目的在于多方面可用,而限于一个部门乃至一个具体项目。除这一类信息资料外,为了生态控制需要,必然专门设计许多规模大小不一、时间范围不同的试验。这样的试验在设计时就要用科学方法,最常见的有随机试验以及以群论为理论基础的正交试验,近 20 多年又用以数论与数理统计结合为基础的均匀试验(uniform design),本节将就这些试验结果的理论处理方法用实例说明。鉴于本书目标,不在于具体讲述统计方法,故不可能对许多数学问题进行过多论述。

一、生态试验生物统计控制方法

经过生态试验寻求指标,再依所得指标进行必要的生态环境控制,这一直是生物统计的主要研究方法。至今应用极为广泛。如所周知,生物统计涉及的内容是十分丰富的,几十年来,这方面书籍也很多,如吴仲贤的《统计遗传学》、赵仁熔的《田间试验生物统

计》、郭祖超院士的《医学生物统计》,近年裴铁璠等的《自然灾害非参数统计方法》等,都含有生物统计方面的内容。概率统计在生态控制中的应用,是生物统计的一个组成部分,它与一般生物统计的共同点当然很多,比如都跟踪应用数学上的新的试验分析方法,但其特点是:一是只限于生态的,即生物与环境关系方面;二是所得结论,在控制上是有意义的,或现实可行,或预计未来可行,比如知道了某种生物的温湿度指标,这在过去没有人工设施、工厂化农业的时代,是不易行,但在有温室、农业工厂的今天,就可行了;三是所作试验,设计时应使其除所针对的环境外,其他条件尽量相同,尤其是遗传基因方面的条件相同,并排除其他干扰,即使管理措施尽量一致,这样才能取得可以对照的试验结果。下面,举一些不同方面的例子。由于具体运算在许多数理统计书籍中都有,一般又有现成的软件可用,故不具体讲述数学方面的原理和运算技巧,而主要讲述生态控制的问题。

1. 西方花蓟马及其天敌生态控制的统计指标

Orius laevigatus L. (Fieber)和 *O. albidipennis* L. (Reuter),在地中海区域的农作物、天然植物西方花蓟马(*Frankliniella occidentalis* L.)的控制中,起重要作用。Sanches和Lacasa(2002)就居于半翅目花蝽科的两种昆虫——Fieber和Reuter——的生物参数与温度的关系作了研究和模造,以便在用于防治的短程控制规划中取得最优化效果。经过试验和统计,指出这两种昆虫的发育时间和繁殖参数,被确定为20℃,25℃,30℃和35℃。器官成熟前的发育时间,对于*O. laevigatus*来说,在20℃时,为34.6 d,在35℃时为12.3 d;对于*O. albidipennis*来说,在20℃时为37.2 d,在35℃时,为10.2 d。发育的临界热量值,*O. laevigatus*为 $(14.2 \pm 0.9)^\circ\text{C}$,显著高于*O. laevigatus* [$(11.3 \pm 0.7)^\circ\text{C}$]。据观测,这两种花蝽科昆虫在,20℃,25℃和30℃时,繁殖能力无显著差异;但在35℃时,*O. albidipennis*的繁殖能力显著高于*O. laevigatus*。解释繁殖、成活同温度关系的非线性模型,是可用的。据估计,对于*O. albidipennis*和*O. laevigatus*来说,繁殖温度上限临界值分别为 $(40.9 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 和 $(35.5 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。不同的最优临界值,至少可以部分地解释在西班牙南部地区的温室和天然植被中,该两种昆虫种群动态的不同分布。作为温度函数的相关系数年际变化较大。从以上统计规律,为控制害虫发生,在当地3月初到5月中旬施放天敌为宜。近年来,类似的试验和统计分析,在国外不少。如Cocuzza等(1997)研究过花蝽科昆虫活动与温度的关系,Sancher等(2000)研究了栽培于西班牙东南部塑料膜温室内的辣椒害虫防治的管理策略。其实,我国的塑料大棚、温室等的面积相当大,其中栽培的蔬菜、花卉、果树等种类繁多。为合理地用生态方法——调温为主——防治虫害,须寻求适应于当地情况和作物构成以及虫源等多方面条件的统计决策。如通过管理策略进行控制是必要的,目前也是可行的。

2. 工业废水改善热力生态动力源:直接统计法

热力工厂和核工业工厂的废水可用于农林作物的灌溉。Baille(1980)给出了两地块上实测的比较结果,其中一个地块是以温度为15℃的废水灌溉的,另一个是非灌溉的,作为比较。温度在5 cm到20 cm深之间,都有变化,并以20 cm深处,灌溉增温比较明显(图6-1)。在土壤等条件比较一致的情形下,增温效果差不太多,所以这样的实验虽然是在法国做的,但对其他地方,也有参考价值。我们在比较了5 cm和10 cm等深度增温结果表明,20 cm深增温约为3℃,这个数据实际上是从曲线上可直接读出,也是取各离散点增温效果求平均值,比如

$$t_m = \frac{1}{10}(t_9 + t_{12} + \dots + t_n) = 3(^{\circ}\text{C})$$

这里下标 m 指平均, 9, 12 等指示当地时间, t 为增温度数, 这是用一阶矩说明平均增温幅度, 还可用二阶矩方差, 求离散程度。其实, 结合图可直接看出, 不必具体计算。

在结合具体作物应用时, 1988~1990 年, 在邻近工厂的日光温室内搞黄瓜育苗, 把育苗袋放入地下, 估计在黄瓜苗生育位置, 用废水灌溉增温可达 8°C , 照苗期所需 9°C , 大约差 1°C , 于是在 20 cm 之下, 设 20 cm 厚的马粪层, 这样可满足育苗所要求的温度。事实证明, 在严冬一次明显降温时, 当地外界气温为 -28.6°C 时, 苗床温度保持 9°C , 苗齐且壮。

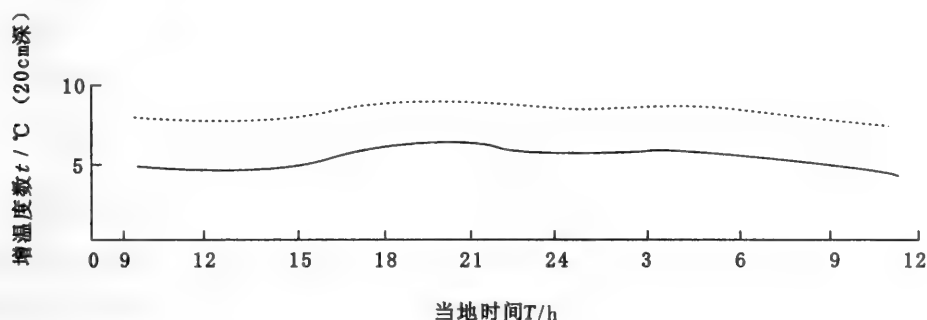


图 6-1 工业废水灌溉增温效果

..... 灌溉 —— 对照

3. 灌溉方式比较: 统计检验法

在试验并获得一定数据时, 只要作简单的统计检验, 就可以得出比较可靠(至少在生态控制中可实际应用)的结果。这种对生态动力源实施有效人工控制的手段, 可用于许多种生物的某一或某些方面的生态控制。下面举出的简例, 是针对节水灌溉问题。这是水文生态动力源调节的一种实用控制。

Moutonnet 等(1980)为比较灌溉方式, 针对玉米作了试验。试验中, 用张力计和商用电阻器两种方案。对所获数据用 t 检验, 按 $p = 0.05$, 结果表明, 前者可节省灌溉用水 30%, 但玉米并不减产, 而后者导致减产 25%。由此, 以采用前方案为宜。由于其他因素在试验中加以比较严格控制, 这部分增减产可归因于水文生态动力源变化这一个单一因素所致的生态产量变化。

4. 黄麻生长与环境关系的确定与控制: 多元回归分析

在野外条件下, 要对作物生态动力条件实施有效控制, 必须通过试验得出有用的信息。这样的信息包括适当地理位置的选择、最优化施肥、灌溉需求和作物保护的有效方法。即使如此, 作物的生态产量的年际波动仍然很大, 这种生态产量变化可归因于各种生态环境因子。虽然在野外条件下, 天气一般是不能控制的, 但协调的生物与天气等环境因子关系是必要的, 也是可能的。

Rao(1980)在印度对黄麻(*Corchorus olitorius* L.)的 4 个品种作了田间试验(随机设计)并同时观测气象环境。对试验数据, 用多元回归分析给出相关系数等结果, 列于表 6-1 和表 6-2。

表 6-1 平均生长率($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)对气象生态动力因子、
作物日龄和累积生长的相对关系

变 量	品 种			
	JRO878	JRO7835	JRO632	JRO3690
最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.3181**	0.3034**	0.2808**	0.3105**
最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.2701**	0.3104**	0.2915**	0.3059**
降水量/mm	-0.2150*	-0.2120*	-0.2480*	-0.2652**
5cm 深土壤温度(上午)/ $^{\circ}\text{C}$	0.2411*	0.2454*	0.2511*	0.2653**
5cm 深土壤温度(下午)/ $^{\circ}\text{C}$	0.0719	0.0783	0.0774	0.0670
日照时数/h	-0.0962	-0.0939	-0.1082	-0.1366
蒸发皿测得的蒸发量/mm	-0.1482	0.1214	0.1013	0.1160
相对湿度/%	-0.0869	-0.0707	-0.0660	-0.0574
累计生长高度/cm	-0.4156***	-0.3996***	-0.4226***	-0.4409***
作物日龄/d	-0.6065***	-0.5803***	-0.5736***	-0.5842***

$n=98$; *, $r_{0.05}=0.1988$; **, $r_{0.01}=0.2593$; ***, $r_{0.001}=0.3277$

有了回归给出的关系,在品种落区位置、地块选择、施肥用药等管理措施方面,便有了一定依据。依此进行优化控制,即所谓掌舵,就会有主动权,通过人工调节,达到增产目的。

表 6-2 就不同品种黄麻的多元回归分析结果
(以生长速率作为因变量)

自 变 量	偏回归系数			
	JRO632	JRO3690	JRO7835	JRO878
最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	-0.197	-0.152	-0.039	-0.049
最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.129	0.186	0.187	0.260
日降水量/mm	-0.050***	-0.057**	-0.034*	-0.039*
上午 5cm 深土温/ $^{\circ}\text{C}$	0.314	0.196	0.154	-0.01
日龄/d	-0.0750***	-0.0704***	-0.0726***	-0.0682***
累计生长/cm	0.0177	0.0147	0.0182	0.0137
回归常数	-0.148	0.425	-2.725	0.805
自由度	98	98	98	98
多元相关系数	0.9737	0.9741	0.9730	0.9689
确定性系数	0.9480	0.9488	0.9468	0.9388
F 值	277	281	270	233

*, **和 ***分别指示 0.05, 0.01 和 0.001 的显著性概率水平。

5. 草本植物生产量年际变化与天气、土壤条件的调控

草原上草本植物生长与大气降水、土壤含氮量等生态动力源因子关系密切。在目前,调节土壤中氮的含量容易做到,在现阶段和今后,利用人工降水手段可进行必要的增雨作业。为此,通过统计模拟找出定量关系是十分必要的。

Seligman 等(1992)用通过检验的模拟模式,研究了未放牧的地中海气候区(孙安健, 1986)内草地生态环境对草本植物生产量和氮素吸收的影响。用多元回归模拟出来的结果,在表 6-3 和 6-4 中给出。

表 6-3 对草本植物生产量和氮素吸收有贡献
的因子间的 R^2

因 子	标准偏差(<i>SD</i>)		变差系数(<i>CV</i>)	
	SS(平方和)	<i>P_r</i> < <i>F</i>	SS(平方和)	<i>P_r</i> < <i>F</i>
	总值百分数		总值百分数	
草本植物生产量(<i>R</i> ²)	0.825		0.964	
降水量	24.1	0.0001	93.0	0.0001
氮的可利用性(<i>N</i>)	40.0	0.0001	3.2	0.0001
土壤深度(<i>S</i>)	18.4	0.0001	0.1	0.3102
氮素吸收(<i>R</i> ²)	0.906		0.964	
降水量	3.4	0.0003	83.9	0.0001
氮的可利用性(<i>N</i>)	81.5	0.0001	11.5	0.0001
土壤深度(<i>S</i>)	5.6	0.0001	1.1	0.0004

Seligman 等的结论是:在草本植物生产量标准偏差 SD_h 和氮素吸收量 SD_n 的标准偏差的变化中,降水量状况、氮素含量水平以及土壤深度所起的作用占 83~91%,而对于草本植物生产量变差系数 CV_h 和氮素吸收量变差系数 CV_n 来说,变差系数变化的 95% 以上,只是由降水量、氮素水平所起的作用。可计算 SD_h 变化的分配,在三个因子中,降水量 24%,氮素可利用性 40%,土壤深度 18%;而 CV_h 的变化,主要原因是降水量,氮素可利用性作用很小(3%),而土壤深度的作用只有 0.1%,可忽略不计。

表 6-4 在地中海型气候环境下,模拟生物量峰值、
氮吸收量的最低、最高值

氮的可用性 /kg·hm ⁻²	土壤深度/mm					
	300		600		1500	
	0	60	0	60	0	60
降雨区(mm)	峰值生物量(干物质)/t·hm ⁻² ·a ⁻¹					
132	0.00~1.30	0.00~2.24	0.00~1.65	0.00~2.65	0.00~1.67	0.00~2.83
264	0.10~1.65	0.10~3.62	0.10~3.04	0.10~4.92	0.10~3.03	0.10~6.33
394	0.42~1.84	0.45~4.45	0.42~2.76	0.45~5.93	0.42~3.00	0.45~6.01
525	0.56~1.78	0.76~4.46	0.75~2.75	0.86~5.75	0.75~3.03	0.86~6.18
	氮的吸收(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)					
132	0~15	0~74	0~22	0~64	0~23	0~63
264	5~18	5~62	5~27	5~70	5~28	5~74
394	9~17	12~68	15~27	18~73	15~28	18~74
525	9~16	11~52	14~26	20~72	18~30	31~76

根据表中给出的有关数据,优化控制的手段一是使草本植物落于雨量适当的区域,二是调节不同土壤深度的氮素。这两者分别为水文和营养生态动力源的调控,依此使作为生态动力汇的草本植物生育尽量适应生态环境,以保障草量的高产稳产,满足放牧养

殖需要,并保持当地的生态平衡。

6. 黑木耳栽培环境待控因子的析出:正交试验统计检验

为了寻求黑木耳栽培优化条件——待控因子,在辽宁东部山区进行栽培试验,并对所得数据作统计检验,结果表明:在夏季温度比较低的时段浇水比较有利,在空气温度为 14.8°C 时(一般是在早晨)浇水最为有利;湿度较大,有利;为满足生育要求,以大量浇水为宜;生态动力源类型的相对重要性:比较材种、水分和温度三者的作用,依次是材种第一,水分第二,温度第三。这说明生物、水文、气象三类生态动力源中,以生物性质的生态动力源最为重要。以上试验是针对生态产量进行的,即假定菌种这种基因因素相同且其他干扰随机影响无大差异下的生态控制实验。依试验结果作优化选择以及在生长期间人工控制浇水量是完全可以做到的。所以依正交试验统计结果,施行必要控制,正是生态微观控制的重要环节。

7. 雪深与土壤温度

在《霜期农业气候学》一书中,已指出冬小麦北移能否成功,很大程度上取决于冬季温度这一生态动力因子,而麦田分蘖节处的地温,即土壤温度的高低,与土壤表面覆盖的雪被厚度关系密切。为合理安排冬小麦种植区(地块),考虑雪的厚度或采用人为措施调节雪的厚度,都是有意义的。但因为积雪和地温关系,受许多随机因素影响,很难给出一个确定性的普遍适用的微分或代数方程式,所以用线性回归方法建立关系是必要的。Sharratt 等(1992)利用 16 个冬季数据统计出在无雪被和 12.5 cm 厚雪被条件下空气温度(图 6-2 和图 6-3),比如从图 6-2 中可查出,在无雪被时,气温 -18°C 对应 1 cm 深土壤温度是 -12°C ;而在有 12.5 cm 厚雪被时,气温 -18°C 时,1 cm 深土壤温度是 -6°C 。假如某品种的越冬作物要求在 1 cm 深土壤温度为 -10°C 时,才能安全越冬,那么同样是 -18°C 的气温,有无雪被明显不同,前一种情况,可以越冬,而后者不行。依此,可安排适当品种,或考虑不同地势下雪被情况调节品种,必要时,对于小范围地方,可以人工加厚雪被,即以人工生态动力源控制环境,为越冬生物这种生态动力汇创造有利环境。

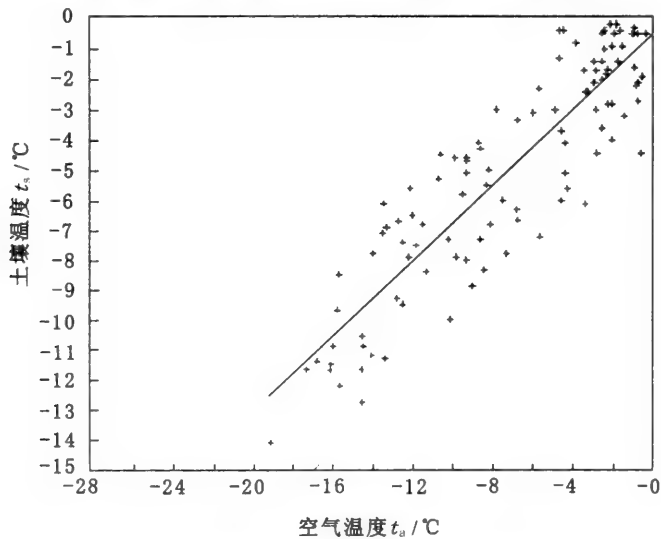


图 6-2 无雪被时空气温度与 1 cm 土壤温度关系

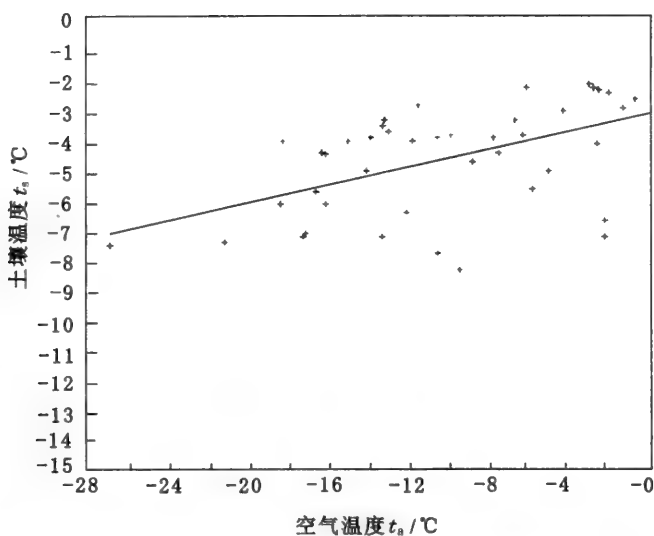


图 6-3 有雪被时空气温度与 1 cm 土壤温度关系

8. 草地生态系统刈割控制:重点考虑典型变量分析(CVA)应用

这一段论述刈割高度、方式、时期等人工生态控制手段在草地生态系统中的作用。由于草地及其生态环境的复杂性决定了这类问题的偶然随机特征,所以在现阶段主要以数理统计方法作分析与综合,再将其结果用于人工生态控制的实践,以求草业发展并维持生态平衡,服务于牧业可持续发展。

(1) 典型变量分析(CAV)与刈割高度

据杨锦忠(2001)所述:在草地研究中,以往所用回归、 t 检验等方法属于定性解释,而用 CVA 方法,杨锦忠作了定量研究。在控制光温的人工草地上,针对高羊茅草丛的三个特征——牧草产量、叶面积和分蘖密度——与刈割高度的关系,用 CVA 结果表明:第一典型相关极显著,且第一典型变量能反映出刈割高度间的 98% 的变异,在 3 cm~24 cm 的高度范围内,刈草高度的作用是渐近式的,任何两个刈草高度间的群体之综合差异与其高度差,呈正比关系;叶面积和分蘖密度对刈割高度间差异的解释能力基本持平,但作用方向相反,两者都大于牧草产量所起的作用。

(2) 不同刈割方式对草地生产性能的影响:方差分析与复极差检验

莫本田等(2001)采用不同刈割高度和不同留茬高度处理,对优良温度组合“苇状羊茅+多年生黑麦草+扁穗雀麦+白三叶”的人工草地,进行刈割利用试验,经方差分析和复极差检验($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$),结果表明:①该混播草地刈割高度以 40 cm 为宜,不仅产量较高,还可使下茬草较快生长,缩短供草间隔时间。在实际生产上,若土壤和肥水等生态动力源管理条件好,可适当提前刈割,以保证下茬草具有良好的营养物质供应基础和较强的摄取养分的能力。②刈割留茬高度以 5 cm 为宜,过高既降低刈割产量,又继续消耗根部积累的养分,影响再生草的生长;过低易损伤再生苗,推迟再生苗的出现和生长。③根据本试验,草地的青绿期仍然是以刈高 40 cm 和茬高 5 cm 最长。在实际生产中,强调草地青绿期长短必须跟生产性能和可利用期密切联系考虑,这样才能充分发挥草地的利用价值。

9. 虾类养殖:回归分析

蒋霞敏等(见张本主编,2002)研究了几种因素对黑斑口虾幼体发育及存活率的影

响。结果指出:①幼体适宜盐度为 16.3~36.4, 逐渐淡化优于突变;②生育温度范围 26℃~30℃, 水温 X 与幼体发育 Y 的关系为

$$Y = 1.2143X^2 - 12.786X + 55.000 \quad R^2 = 0.9339$$

③第三期假蚤状幼体(Z_3)饥饿时间 X 与存活率 Y 呈负相关

$$Y = 1.0476X^2 - 23.343X + 121.43 \quad R^2 = 0.9595$$

二、均匀设计在生态控制试验中的应用

这一论题仍是统计随机原理在生态控制中应用的一个重要方面。

1. 基础原理

统计试验设计是统计学的重要分支, 它能节省人力财力, 用较少的试验次数获得较好的试验结果, 能将试验数据从随机误差的烟幕中去伪存真, 抓住事物的本质规律。所以正如 Atkinson 等(1992)所说: “一个精心设计的试验是认识世界的有效方法。”方开泰等(2001)的近著对试验设计作了简单而精辟的论述。由于在生态控制的理论与实践问题中, 有相当多而复杂的随机性质问题, 所以用有充分理论依据的数学方法, 科学安排试验, 并用统计方法处理试验数据, 是生态控制必不可少的工作。早年的生物田间试验等即是这方面工作的雏形。

试验设计的方法很多, 至今方开泰研究员和王元院士以数论与统计结合的思想 (*Number - Theoretic methods in Statistics*, Chapman & Hall, 1994) 设计出来的均匀设计方法, 已得到广泛应用。其根本优点是用有限次数试验, 以达到较好的效果。其在生态控制中应用, 效果良好, 并有广阔的应用前景。下面举例说明。

2. 含有定性因素生态控制试验之例

在生态控制试验中, 定性因素是常出现的, 如在农业生态中, 品种的种子生态动力源问题, 作物营养的营养生态动力源问题等。在过去常用的以群论为理论基础的正交设计中, 所作的试验是以方差分析模型为依据的, 那样对连续型因素(如作物的环境温度、风等以及时间)作离散化(分成若干个水平), 而定性因素本身的水平就是离散的, 在试验安排和方差分析时, 两种不同类型的因子并没有区别对待。但进一步希望用回归模型来拟合实验数据的时候, 则连续型因子比较方便, 而对于定性因子, 就必须用伪变量方法加以处理。

由于均匀设计的数据分析, 主要用回归分析模型, 对定性变量需要作特别处理。基本处理方法, 在均匀设计中应用如下。

若一个试验中有 s 个因子 x_1, x_2, \dots, x_s , 其中 x_1, \dots, x_k 为定量因子(连续变量), x_{k+1}, \dots, x_s 为定性变量。用均匀设计表安排试验做法是:

(1) 试验规模大小的确定

设 x_{k+1}, \dots, x_s 的水平分别为 q_{k+1}, \dots, q_s , 它们各自需要定义 $q_{k+1} - 1, \dots, q_s - 1$ 个伪变量, 这样, 共有

$$m = \sum_{j=k+1}^s (q_j - 1) \quad (6-1)$$

个伪变量, 将其记为 z_1, \dots, z_m 。如果响应 y 与 x_1, \dots, x_s 间可用线性模型

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=1}^m r_j z_j + \epsilon \quad (6-2)$$

来拟合,该模型中有 $m+k+2$ 个未知参数 $\{\beta_0, \cdots, \beta_k; r_1, \cdots, r_m\}$ 和 σ^2 。因此,试验数 n 必须大于 $m+k+2$ 。如果响应 y 和因素间可用二次模型

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^m r_j z_j + \epsilon \tag{6-3}$$

来拟合,其中未知数的数目就更多,相应的试验次数也必然增加。由于 $z_j^2 = z_j, z_i z_j = 0 (i \neq j)$,故不需要考虑伪变量的平方项和交叉项。

(2)均匀设计表的选择

由前面讨论可知, $U_n(n^s)$ 表不适合于安排有 n 个属性的定性因子的试验,需要的是 $U_n(q^s)$ 表, $q < n$ 或混合水平的均匀设计表 $U_n(q_1^{t_1} \cdots x q_l^{t_l})$, $t_1 + \cdots + t_l = s$ 。

例如,考虑影响某种一年生植物生态产量的四类生态动力因子:①属于营养生态动力源的氮肥施用量 x ,分为 12 个水平(70,74,78,82,86,90,94,98,102,106,110,114);②属于人类活动生态动力源的播前的浸种时间 t ,分为 6 个水平(1,2,3,4,5,6);③属于土壤生态动力源的土壤类型 B ,分为 4 种 B_1, B_2, B_3, B_4 ;④属于种子生态动力源的植物品种 A ,分为 3 个, A_1, A_2, A_3 。这四个因子中,前两个为定量因子,后两个为定性因子。从混合水平的均匀设计表 $U_{12}(12 \times 6 \times 4 \times 3^2 \times 2^2)$ 的前 4 列,而得表 6-5。

表 6-5 生态产量控制因子的试验安排

x	t	B	A	y	x	t	B	A	y
70	1	B_1	A_2	771	94	1	B_3	A_1	1053
74	2	B_2	A_3	901	98	2	B_4	A_3	1069
78	3	B_3	A_2	899	102	3	B_1	A_1	1187
82	4	B_4	A_3	927	106	4	B_2	A_2	1220
86	5	B_1	A_1	1111	110	5	B_3	A_1	1062
90	6	B_2	A_3	1271	114	6	B_4	A_2	974

如果考虑线性回归模型

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 t + r_1 z_{31} + r_2 z_{32} + r_3 z_{33} + r_4 z_{41} + r_5 z_{42} + \epsilon \tag{6-4}$$

其中 z_{31}, z_{32}, z_{33} 是土壤生态动力因子的虚拟变量, z_{41}, z_{42} 是种子生态动力因子的虚拟变量。上述模型可以表示为有矩阵的方程。经运算得到参数的最小二乘估计为 $\hat{\beta}_0 = 158.96, \hat{\beta}_1 = 8.54, \hat{\beta}_2 = 12.625, \hat{r}_1 = 231.09, \hat{r}_2 = 208.98, \hat{r}_3 = 144.45, \hat{r}_4 = -124.50, \hat{r}_5 = -168.875, R = 0.8735, F = 1.84$, 不显著。故需进一步考虑交互回归项。

如果除主效应外,考虑二次效应 x^2 和交互效应 $t \cdot z_{32}$, 回归方程化为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 (x^2) + \beta_3 t + \beta_4 (t \cdot z_{32}) + r_1 z_{31} + r_2 z_{32} + r_3 z_{33} + r_4 z_{41} + r_5 z_{42} + \epsilon \tag{6-5}$$

用最小二乘估计得

$$\begin{aligned} \hat{y} = & -3898.3642 + 98.8649x - 0.4937x^2 + 9.86t \\ & + 11.06(t \cdot z_{32}) + 199.9875z_{31} + 144.7927z_{32} \\ & + 101.6902z_{33} - 91.3200z_{41} - 41.692z_{42} \end{aligned} \tag{6-6}$$

相应的 $R = 1.00$, $F = 14171$, 非常显著。根据上式可以得出最优水平组合为 $x = 100.127$, $t = 6$, $B = B_2$, $A = A_3$ 。此时, 最大估计值为 1321.4515。

3. 应用广泛性展望

从以上论述和实例计算的过程, 不难看出, 只要针对具体的生态动力汇研究对象, 比如苗木、农作物、牧草、渔类等, 许多生态控制问题, 都是可以解决的, 之所以运用均匀设计方法及其所选择相应的表格, 是因为所针对的生态动力源问题及其所用因子, 一般都有定量和定性的。有些因子在相当长时期内难以定量。从生态动力源信息看, 如第三章所述那样, 各种信息源, 无论是定性, 还是定量, 我们都应充分利用。一般说来, 属于气象、水文类的因子, 定量资料较多, 像温度、湿度、径流、降水、风等, 并且都是连续变量, 尤其是自记记录, 更能直观显示。而像一些分类的因子, 如种子、土壤类型等则多为定性。上述均匀设计的方法, 把这些资料作为因子的代表值综合运用, 其发展前景是广阔的。由于有了计算程序, 用户只要给出一定数据, 即可迅速获得结果, 这对农业科学上选用地块、科学用种、科学施肥是十分有益的, 以利获得高生态产量。

对于动物, 则主要是生态增重问题, 以如家畜、家禽、鱼类和湿地鸟类等, 也可以从生态增重角度进行试验。

第二节 动物性别对抗与交尾优化控制模式

动物性别对抗的统计规律, 是使自然界动物生态优化控制和有利于人工干预动物繁殖的重要措施, 本节从统计与随机决策方面, 论述优化途径。例子虽是鸟类和鱼类, 对其他动物相应研究, 也有参考价值。

一、交尾系统中的性别对抗: 统计决策

最新研究显示, 交尾系统中, 两性之间利益的对抗, 通常在亲代的动物中发生 (Smith *et al.*, 1998)。这样的性别对抗, 可能形成限制雄性成功繁殖的雌性交尾策略的演化。下面以亲代抚育成对单角鲀的个例分析为例予以说明。

参照以前不同的动物性别对抗的研究成果, Kokita 等研究了单角鲀 (*O. longirostris*) 的最优交尾系统, 提出: 最优交尾系统中的性别对抗大大地影响着缺乏亲代抚育的这一领域珊瑚礁鱼的交尾系统。

1. 观察试验与统计分析结果

通过观察试验, 并对大量资料进行统计计算, Kokita 等给出如下个体生长率 (单位: $\% \cdot d^{-1}$) 方程

$$G = \frac{100 \times (\ln L_2 - \ln L_1)}{t_2 - t_1} \quad (6-7)$$

式中, G 是每天的比生长率, L_1 和 L_2 分别是繁殖季节开始时和结束时的体长 (Wootton, 1998)。繁殖季节的存活率, 以整个繁殖季节作标记的鱼的成活比例来计算; 而繁殖季节之后的非繁殖季节的存活率, 以从繁殖季节结束到下一个繁殖季节开始期间内作标记的鱼的比来计算。

该研究中的大部分数据是用非参数检验加以分析的 (裴铁璠等, 1999)。而用参数检验时, 都涉及 Pearson 相关, 数据拟合正态分布 (Kolmogorov - Smirnov 单样本检验: $p >$

0.05)。为描述的目的给出平均值 \pm SD, 一切 p 值都是双尾的。

该研究给出的主要结果:

(1) 与交尾状态有关的雄性领域防御

一雄多雌状态的雄性, 比一雄一雌状态的雄性, 有较大的领域, 但在领域内珊瑚礁的覆盖面积的百分率是不一样的。前者运动速率超过后者, 但聚集的频率是不同的。

(2) 与交尾状态有关的雄性拟合率

在研究中未观察到群体外的交尾, 这说明一雄多雌状态的雄性在防御两种状态的雌性方面是成功的。雄性繁殖的成功次数关系到雄性的体长(一雄一雌: $r = 0.52$, $F_{1,13} = 4.92$, $N = 15$, $p < 0.05$; 一雄多雌: $r = 0.79$, $F_{1,4} = 6.84$, $N = 6$, $p = 0.06$)。一雄多雌状态的雄性, 比一雄一雌状态的雄性, 享有较高的繁殖成功次数, 前者大约是后者的 2 倍。

(3) 与交尾有关的雄性拟合率

对于三种类型的交尾状态(一雄一雌、一雄多雌的初状态、一雄多雌的次状态)来说, 雌性体长有显著差异, 一雄多雌的次状态小于一雄多雌的初状态。三种类型的生长率, 无显著差异。存活率也无显著差异。

(4) 一雄多雌交尾系统中雌性的群聚

在一雄多雌的初状态和次状态下的雌性, 显示出比一雄一雌状态下的雌性, 更频繁的对雄性的求偶意向(Kruskal - Wallis 检验: $H_2 = 13.5$, $p < 0.002$), 聚集的次数较多。处于一雄多雌状态的雌性的同种群聚包括: 抵制同其他雄性配对的相邻雌性的相互作用; 抵制分享同一雄性的其他雌性的相互作用。对于前一种聚集来说, 一雄一雌、一雄多雌初状态(0.18 ± 0.10 , $N = 9$)与一雄多雌次状态(0.19 ± 0.06 , $N = 9$; Kruskal - Wallis 检验: $H_2 = 0.88$, $p = 0.64$)之间, 没有显著差异。按配对方式比较, 无论是初状态的雌性(0.39 ± 0.06 , $N = 9$)或者是次状态的雌性(0.35 ± 0.08 , $N = 9$), 互相群聚于一雄多雌群的次数, 超过进入领域雌性而群聚的次数(Wilcoxon 符号秩检验: 初状态 $T = 0$, $p < 0.008$; 次状态 $T = 1$, $p < 0.002$)。这样, 初状态雌性与次状态雌性之间的群聚相互作用, 常出现在领域边缘附近。然而, 一雄多雌的雄性, 通过两种活动迫使雌性群聚: 一是干扰雌性之间的相互作用; 二是将每条雌性驱赶至其领域的角落。

2. 交尾系统

对于单角鲀来说, 处于一雄多雌状态下的雌性, 引诱其雄性的次数多于一雄一雌状态下的雌性, 前者排斥其他雌性的次数也多, 说明雌一雌强竞争是存在的。浮游的那些雌性, 在繁殖季节开始时, 常常接近一雄一雌状态下的雄性, 但是雄性袭击这些雌性并往往驱赶她们离开。成功的一雄多雌状态不仅减少了在领域防御中雄性的援助作用, 而且也减少了一雄一雌状态下雌性的领域范围。这样的雌性群聚可以解释“成功的一雄多雌罕见”的原因之所在。雌性群聚阻止一雄多雌的思想, 是对动物尤其是对鸟类的一雄一雌进化来说最重要的假设之一。雌性群聚假设可用于单角鲀中占优势的一雄一雌状态, 当然, 进一步的试验研究是必要的。

对于一些雌性来说, 由于种群中性比率略偏向于雌性, 加上雄性对群聚的干扰, 最优化的交尾系统是很难形成的。研究表明, 单角鲀的交尾系统是性对抗的结果, 雄性得益于一雄多雌, 而雌性在一雄一雌情形下为佳。这样的对抗可能是缺少单亲抚育的其他配对领域的珊瑚礁鱼一雄一雌状态得以维持的主要理由。

依据以上试验研究和统计分析结果, 为使交尾系统达到最优化, 首要的步骤是调节

种群中雄雌性别比率,使其尽量达到平衡;其次,是设法减少雄性对雌性群聚的干扰。当然,上述两件事在自然状态下,是难以实施的。但可以通过实验室的试验,得出一些初步结果。

本节所研究的性别控制策略的方法,可以针对不同动物进行。

二、交尾析因设计最优化

按鱼种遗传力推断,Dupont-Nivet 利用随机模式,作了交尾析因和偏析因设计最优化的研究,以比较不同设计的有效性,确定用于每种设计的最优化次数。用遗传力估计的最低误差方法找出“种类”容量和“种类”数目的最有效组合方式。

1. 基本方法

(1)数量特性模拟

数量特征是就每个个体模拟的。每个特性,都被认为受其基因加性效应和环境效应的影响,并表示成如下关系

$$P_j = A_j + \lambda_i (\sigma_e^2)^{1/2} \quad (6-8)$$

式中, P_j 是第 j 个动物的表型值, A_j 是它的基因累加值, λ_i 是与标准正态分布 $N(0,1)$ 的偏差, σ_e^2 是环境方差。 A_j 按下式计算得出

$$A_j = \frac{1}{2} A_s + \frac{1}{2} A_d + \epsilon_i (\sigma_a^2/2)^{1/2} \quad (6-9)$$

这里, A_s 和 A_d 分别是第 s 条雄性鱼和第 d 条雌性鱼的繁殖累加值, ϵ_i 是与正态分布 $N(0,1)$ 的随机偏差, σ_a^2 是基因累加方差, $\epsilon_i (\sigma_a^2/2)^{1/2}$ 说明孟德尔抽样的作用。

雌雄对的繁殖值 A_i 是按式模拟的

$$A_i = \delta_i \sigma_a \quad (6-10)$$

式中, δ_i 是与正态分布 $N(0,1)$ 的随机偏差。 δ_i , λ_i 和 ϵ_i 是未经订正的。

选择 σ_a 和 σ_e 值的原则是能够研究遗传力的三个水平:0.5,0.25 和 0.1。

(2)遗传力估计

对于每一模拟种群来说,用 SAS 系统 MIXED 程序的 REML 方法,按如下模式进行模拟

$$P_{ijk} = \mu + s_i + d_j + e_{ijk} \quad (6-11)$$

式中, P_{ijk} 是第 i 条雄性鱼、第 j 条雌性鱼的第 k 条后代, μ 是总平均值, s_i 是第 i 条雄性鱼的随机效应, d_j 是第 j 条雌性鱼的随机作用, e_{ijk} 是随机残差。

对于每一次重复, h^2 是由下式估计的

$$h^2 = \frac{4\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_e^2} \quad (6-12)$$

式中, σ_s^2 是雄性鱼之间的方差, σ_d^2 是雌性鱼之间的方差, σ_e^2 是剩余方差。两雄性鱼之间的遗传力的估计值,表达雄性鱼遗传力内部两雌性鱼之间的作用,因为在母性和优势度作用下仍是无偏的,这些不包括在这种模拟模式中,但可能同实际数据一道出现。

对于每一种设计来说,遗传力误差是从与一切重要的遗传力估计值的标准偏差估计出来的。对于一切组合,都按 5000 次重复。

2. 结果分析

对析因设计和部分析因设计的结果,分别就高(0.5)、中(0.25)和低(0.1)遗传力加

以分析。

(1) 样本容量和遗传力精度

当后代的数目从 300 增至 1000 时,遗传力精度增加。当样本容量从 300 增至 1000 个动物时,可以得到的标准偏差: $h^2=0.5$ 情形下,从 0.206 降到 0.118; $h^2=0.25$ 时,从 0.149 降到 0.083; $h^2=0.1$,从 0.1 降到 0.054。3000 或 1000 个个体的样本之间标准偏差的减少率,无论 h^2 的值是多少,都是相同的。

(2) 遗传力水平、设计类别和遗传力精度

对于高等遗传力(0.5)来说,无论样本容量和设计方法如何,最好的结果都见于容量最小的种类,即在每个完全同胞种类(fullsib family)中有 3~5 个后代的情形。在容量最优时,FF 设计(全析因, s 条雄性鱼同 s 条雌性鱼一一交尾, s^2 个种类)是最坏的设计。对 300 后代的样本容量来说,FD 设计(s 条雄性鱼,每条同两条雌性鱼交尾, $2s$ 个种类)给出最精确的估计值。对于 1000 后代的样本容量来说,FD 和 BH[由 Berg 和 Henryon(1998)描述的设计,即 s 条雄性鱼同 s 条雌性鱼按如下规则的交尾:1 号雄性鱼对 1 号和 2 号雌性鱼;2 号雄性对 2 号和 3 号雌性,……,S 号雄性对 1 号和 S 号雌性, $2s$ 个种类]容量设计给出类似的结果,而 FF 的精度很低。

对于中等遗传力、低等遗传力的情形,也作了类似设计与分析。

3. 总结与展望

经过试验研究 Dupont - Nivet 总结道:在大多数情形下,FD 设计、BH 设计不如 FF 设计。除遗传型后代数目 $NO=1000$ 和遗传力水平 $h^2=0.5$ 的情形之外,FD 设计的精度总是高于 BH 设计。对于 FD 和 BH 设计来说,种类的最优化容量是相似的:对于 $h^2=0.5$ 的情形,每个种类有 3~5 个后代;对于 $h^2=0.25$ 的情形,每个种类有 5~8 个后代;对于 $h^2=0.1$ 的情形,每个种类有 10~20 个后代。

从以上简述析因交尾设计的随机模拟过程和结果可知,这种设计在生态控制中有一定领先作用。值得注意的主要优点为:

(1) 最新获得信息工具的应用

近年,微型卫星(microsatellite)(在第三章第二节已略述),能提供关于海洋鱼群种的有关信息(Krieg *et al.*, 1999),这也是本研究能够进行的信息物质基础。

(2) 遗传与生态结合

本项工作系将动物遗传基因与生态控制结合的一个好的范例。这就将以往裴铁璠等(2001)所提出的种子生态动力源扩展到超出植物种子的范围,而成为种群生态动力的内容,表明关于基因与生态结合的植物(如玉米、甘蔗)育种、用种的生态动力问题类推到动物(如鱼类)的合理交尾。

(3) 科学运用随机方法

这项工作,虽不可用确定性数学模型加以表达,但所提出的随机模型,是根据客观可能存在的事实,加以排列组合,这就增强了随机模型的生态学意义。

综上所述,此试验有一定的实用意义,并有很好的理论价值。类似工作,完全可以针对许多种动物进行研究,对于陆生哺乳纲等动物,由于种群容量更易掌握,所以该方法如用于家畜繁殖等,可能会更有效。

就生活在水中的鱼类等动物来说,除动物本身,即鱼和鱼的关系之外,尚存在动物与植物(如海洋中,池塘中的植物)、动物与非生物的生态动力源因子(如海洋、风暴、风暴

潮、赤潮等)有关。今后,如将各种生态动力源因子对动物交尾影响考虑在内,设计的结果,当可更加客观,这也是动物性别生态控制最优化所追逐的目标之一。随着信息来源的丰富,监测手段的优化,新的优化控制随机研究,将是前景广阔。

第三节 最优饲料理论:统计模式

在动物营养生态动力源中,饲料的最优化是生态工作者历来十分关心的问题。在过去 30 多年时间里,用最优饲料理论(optimal diet theory,缩写 ODT)解释的动物饲料,就此需求,作过许多研究工作。Sih 等(2001)对以往的 134 项 ODT 研究作了全面评述。

如所周知,有机体的饲料是其生态小生境的基础之一,是营养生态动力源的根本所在。饲料量化早已是并将继续是动物种类的生存学研究的第一步工作。

最优饲料理论是通过分析大量的研究(实验室、野外试验)资料,用统计方法得出。历时 10 a(1986~1995)的工作研究对象包括许多觅食者-食饵,即:双翅蝇-无脊椎动物,蝙蝠-昆虫;鸢-野生酸苹果、蜗牛,食草动物-植物,食蚊鱼-浮游性动物,蝠蛾-水果,蜉蝣-浮游性动物,蛎鹬-贻贝,金鲈-拟鲤,甲虫-柳树,锯蜂-柳树,蚁-种子,桡足类甲壳动物-青紫菌,蜥蜴-无脊椎动物,哺乳动物-昆虫,海狸-蔬菜,……。

定量研究与 ODT 的拟合程度超过定性研究($\chi^2_1 = 10.4, p < 0.01$)。用五个因素(研究年份、实验室或野外、试验或不试验、觅食者类型、食饵类型)作的多元回归进一步证实如下观点:增加了食饵活动性,对于与 ODT 的平均拟合程度有负作用。无论是定性研究或者是定量研究,只有食饵的活动性与 ODT 能力有显著关系,才能解释所观察到的饲料特性(定性: $r = -0.301, P = 0.004$;定量:偏 $r = -0.466, p = 0.04$)。对于定量研究来说,用 $\alpha = 0.10$ 作为包含阈值的逐步回归,包括作为唯一显著因素的食饵的活动性。有意义的是,定性研究的逐步回归包括三个因素:食饵的活动性($p = 0.04$),研究年(偏 $r = -0.176, p = 0.07$)以及研究是否包括试验(偏 $r = 0.168, p = 0.08$)。

经过大量统计计算,Sih 给出的主要结论是:对于依赖于不动食饵的觅食者来说,最优饲料理论,一般是很好用的,但该理论通常不能说明袭击抓捕动态食饵的觅食的饲料问题。当研究方案较密切地配合模式决定的时候,运用该理论成功的可能性较大。而觅食者类型(无脊椎动物、冷血脊椎动物、温血脊椎动物)不同,成功的可能性也不同。该理论用于动态食饵之所以不成功,现有两种解释:一种是可用于动态食饵研究的严格检验最优饲料理论所需的关键参数的信息,往往是不足的;另一种是对于动物食饵来说,易受攻击的食饵的变化性(遭遇率、捕获成功率),通常比捕食者的变化性更大。

据 Sih 等统计,有 35 项研究包括 ODT 定量检验,有 99 项研究涉及定性研究。定量研究,主要是针对鸟类或哺乳动物来做的,而定性研究主要是无脊椎动物和冷血脊椎动物进行的。这两种类型的研究,捕食者的分布有显著差异($\chi^2_1 = 10.6, p < 0.01$)。在所有的研究中,半数以上(59.7%)不动的或实质上不动的食饵,而只有 20% 的研究(其中定量研究只有 14%)是相对动态的食饵。

第四节 生态控制随机过程

随机过程是复杂生态系统的重要特征之一。在《生态动力学》一书中的若干章节,曾

不同程度地提到随机过程,也曾用于生态动力学的理论和实际问题中。这当然是生态控制的基础之一。但是,出于控制的目的,仅有生态动力学上的认识还不够充分,于是撰写此节,并在概述有关主要概念基础上,例述应用。

如果一个生态控制系统的状态演化可以用一个随时间 t 变化的随机变量 $X(t)$ 来描述,则称该系统状态为一随机过程。例如在 20 世纪的 100 a 时间内,某区域作物生态产量的状态演化可用每年的生态产量表示(比如说,1901 年为 $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 1902 年为 $38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, ..., 2000 年为 $595 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 等),则该系统状态构成一个随机过程。初见数字,可感性认识到,由于人为控制生态条件的逐年优化(防旱涝灾害、合理施肥等),使生态产量有明显上升之趋势。用比较严格的数字语言来说,如果对于每一个 $t \in T$ (T 是某个参数集), $X(t)$ 是随机变量,则称随机变量族 $\{X(t), t \in T\}$ 为随机过程。

一、概率密度

在生态控制问题中,经常遇到概率密度问题。如在 1949 年某种一年生植物的生态产量是 $20 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 1950 年 $28 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 1990 年 $315 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, ..., 2000 年是 $320 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 等。设生态产量是受人工生态动力源影响的随机变量 X , 那么可以用

$$P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \cdots; x_1, t_1) \quad (6-13)$$

表示随机变量 X 在时刻 t_1 取 x_1, \cdots , 在时刻 t_n 取 x_n 的联合概率密度。由概率论基本原理和随机过程定义可知 P_n 具有以下性质: $P_n \geq 0$; 交换任意两对 (x_k, t_k) 和 (x_j, t_j) 时, P_n 不变; 可约条件为

$$\int P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \cdots; x_1, t_1) dx_n = P_{n-1}(x_{n-1}, t_{n-1}; x_{n-2}, t_{n-2}; \cdots; x_1, t_1) \quad (6-14)$$

另外,还有归一化条件, $\int P_1(x_1, t_1) dx = 1$, 联合概率密度描述随机过程的统计规律性。

二、平稳性

平稳随机过程可以定义为各阶矩不受时间平移影响的过程。在生态系统、生态动力源和汇中,可表示为平稳随机过程的因子是很多的,如水文气象生态动力源中,年降水的时间序列,已如《生态动力学》一书所述。又如害虫和天敌在一个区域内各自随时间的变化等。描述时间序列的有 AR 模型、ARMA 模型等。对于这些,我国陈兆国、杜金观、曹鸿兴、史久恩、项静恬、潘一民等多位研究员都有研究。这些数学方面的研究成果,在生态控制中,都会有很多应用。

三、Марков 过程

Марков 过程是随机过程中的一个重要过程,亦称无后效的随机过程。该过程在生态控制的实际问题中很多。从微观生态控制来说,某一年对某种作物施化肥改善其营养生态动力状况,可以认为一般是无后效的,当年施肥,当年受益。但改良土壤的无后效性,就不能以一年为周期,而要以几十年为周期。又如我国大小兴安岭纬度较高山区乔木生长对土壤的影响,则以百年为周期,才具备马尔可夫性。

现在,我们用数学公式表示 Марков 过程。考虑任意 n 个相继时刻, $t_1 < t_2 < \cdots < t_n$, 如果有

$$P_{n,n-1}(x_n, t_n/x_{n-1}, t_{n-1}; \cdots; x_2, t_2/x_1, t_1) \\ = P(x_n, t_n/x_{n-1}, t_{n-1}) \quad (6-15)$$

即给定了 t_{n-1}, x_{n-1} , 则在 t_n 的条件概率被唯一确定与更早时刻(即 t_{n-2} 以前)的随机变量 $X(t_{n-2}), X(t_{n-3})$ 等的取值无关。比如某种动物第 n 代的耐寒性只与第 $n-1$ 代有关, 而与其前面的第 $n-2, n-3$ 代无关, 就好比说, 人的身体适应环境能力只与父辈体质有关, 而与其上多辈的体质无关一样。这样的随机过程就是 Марков 过程。换句话说, Марков 过程是一种只对最后的历史数据有记忆的过程: 条件概率

$$P(x_n, t_n/x_{n-1}, t_{n-1}) \quad (6-16)$$

叫做跃迁概率。

由 Марков 定义, 经过简单推导, 即可得

$$P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \cdots; x_1, t_1) \\ = \prod_{i=2}^n P(x_i, t_i/x_{i-1}, t_{i-1}) P_1(x_1, t_1) \quad (6-17)$$

式(6-17)表明 Марков 过程完全由 $P_1(x_1, t_1)$ 和跃迁概率 $P(x_i, t_i/x_{i-1}, t_{i-1})$ 决定。不难看出, 许多生态控制过程具有这一性质, 从而可以使问题简化, 使 Марков 过程在生态控制中得到广泛应用。比如树木防风措施、防护林网结构, 温室霜霉病防御的决策等。

四、Chapman - Колмогоров 方程

将式(6-17)两边对 x_2 积分, 对时间序列 $t_1 < t_2 < t_3$, 则有

$$P_2(x_3, t_3; x_1, t_1) = P_1(x_1, t_1) \int P(x_3, t_3/x_2, t_2) P(x_2, t_2/x_1, t_1) dx_2 \quad (6-18)$$

除以 $P_1(x_1, t_1)$, 于是有

$$P(x_3, t_3/x_1, t_1) = \int P(x_3, t_3/x_2, t_2) P(x_2, t_2/x_1, t_1) dx_2 \quad (6-19)$$

式(6-19)叫做 Chapman - Колмогоров 方程, 它是任何 Марков 过程之跃迁概率必须服从的方程。其意义是, 对于 Марков 过程, 一大步的转移, 可通过两小步转移来达到, 而两小步的跃迁概率, 在统计意义上是独立的。由此不难看出, 生态环境增优的人为努力控制中, 要实现一大步的转移, 可通过两小步完成。

第五节 马尔可夫链与生态产量预测控制

一个系统的状态随着某些参数(例如时间或空间)的变化, 从现存的状态转移到将来的状态, 其转移概率有可能与系统过去的状态有关。比如动物现有体重与其过去的体重有关, 将来的体重不仅与现有体重有关, 也同若干年前的体重有关。这是从生物一般情况出发的预计。还有人们熟悉的多年生的哺乳纲动物往往在无人工生态动力干扰时, 基本如此。但是, 有许多时候, 为了某种需要, 则要进行体重控制, 使动物体长或身高与体重协调。这样, 只就生态关系考虑, 未来的状态, 如果以生态增重量 ΔW 表示, 未来的值只与现在有关, 如用 t 表示时年, 则 ΔW_{t+1} 关系到 ΔW_t , 而与其前的 $\Delta W_{t-1}, \Delta W_{t-2}$ 等无关。如果从 ΔW_t 到 ΔW_{t+1} 的转移概率只与现在状态有关, 而与过去的许多状态无关, 这种变化过程就是马尔可夫过程。进一步来说, 如果状态变化仅在参数的离散点(如时间离散点)上发生, 而且状态也是离散的, 那么该过程就是离散参数的马尔可夫链。这样,

上面所说的年生态增重量就是马尔可夫链。同理,生态产量也是马尔可夫链。这里值得注意的是,必须把实际增重量、实际产量,同生态增重量、生态产量加以区别,因为实际增重量、实际产量,不仅与生态动力源有关,而且与基因、干扰等有关,所以其序列一般不是马尔可夫链。而生态的相应值则具有马尔可夫性。因为体重生态增重量与生态动力源关系密切,生态产量也是这样。

下面举一个例子。某生态具出现生态产量丰歉年(生态产量高为丰,低为歉)的年序列为:丰、歉、歉、歉、丰、丰、歉、丰、丰、丰、歉、歉、歉、丰、丰、丰、丰、歉、歉、歉、歉。现在分别计算一重、二重、三重转移概率矩阵,并预测后年的丰歉概率。

现取 l 重顺序相邻状态。

当 $l=1, q=2$, 即有两种一重状态, 即丰、歉。以状态 1 表示歉, 状态 2 表示丰, 则可得 P_{ij} 的具体值如下, $p_{11}=0.7, p_{12}=0.3, p_{21}=0.4, p_{22}=0.6$, 故得出如下的一重一步转移概率矩阵

$$P^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

当在第 $r+1$ 时刻, 系统的 m 种状态全都出现过的情形下, 一重一步转移概率矩阵亦即所用的转移概率矩阵。

当 $l=2$ 时, 考察所给资料, 在连续 21 a 内, 有 $q=4$, 亦即有 4 种二重状态: 歉歉, 歉丰, 丰丰, 丰歉, 我们依次以状态 1, 2, 3, 4 表示, 亦即 p_{ij} 的下标 i 可以为 1, 2, 3, 4。而下标 j 仍状态 1 代表歉, 状态 2 代表丰。则有 p_{ij} 的具体值为

$$p_{11} = \frac{4}{6}, p_{12} = \frac{2}{6}, p_{21} = 0, p_{22} = \frac{3}{3}$$

$$p_{31} = \frac{3}{6}, p_{32} = \frac{3}{6}, p_{41} = \frac{3}{4}, p_{42} = \frac{1}{4}$$

二重一步转移概率矩阵为

$$P^{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

当 $l=3$ 时, 有 $q=7$, 亦即有 7 种三重状态: 丰歉歉, 歉歉歉, 歉歉丰, 歉丰丰, 丰丰歉, 丰歉丰, 丰丰丰, 依次以状态 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 表示之, 则 p_{ij} 的具体值为

$$p_{11} = \frac{1}{3}, p_{12} = 0, p_{21} = \frac{1}{3}, p_{22} = \frac{2}{3}$$

$$p_{31} = 0, p_{32} = \frac{2}{2}, p_{41} = \frac{1}{3}, p_{42} = \frac{2}{3}$$

$$p_{51} = \frac{2}{3}, p_{52} = \frac{1}{3}, p_{61} = 0, p_{62} = 1$$

$$p_{71} = \frac{2}{3}, p_{72} = \frac{1}{3}$$

三重一步转移概率矩阵为

$$P^{(3)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

对于二重状态来说,由资料可知,最后两年为歉歉,所以初始状态为 1,亦即

$$P(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

二重二步转移概率矩阵,由多重转移概率公式

$$P^{(0)}(2) = \begin{bmatrix} p_{11}^{(1)}(2) & p_{12}^{(1)}(2) & \cdots & p_{1m}^{(1)}(2) \\ p_{21}^{(1)}(2) & p_{22}^{(1)}(2) & \cdots & p_{2m}^{(1)}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{q1}^{(1)}(2) & p_{q2}^{(1)}(2) & \cdots & p_{qm}^{(1)}(2) \end{bmatrix}$$

以及关系式

$$p_{ij}^{(l)} = p_{i1}^{(l)} p_{1j}^{(l)} + p_{i2}^{(l)} p_{2j}^{(l)} + \cdots + p_{im}^{(l)} p_{mj}^{(l)} = \sum_{k=1}^M p_{ik}^{(l)} p_{kj}^{(l)}$$

得到其结果

$$P^{(2)}(2) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \times \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \times 0 & \frac{2}{3} \times \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \times 1 \\ 0 \times \frac{2}{3} + 1 \times 0 & 0 \times \frac{1}{3} + 1 \times 1 \\ \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} + \frac{1}{2} \times 0 & \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \times 1 \\ \frac{3}{4} \times \frac{2}{3} + \frac{1}{4} \times 0 & \frac{3}{4} \times \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{9} & \frac{5}{9} \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

所以后年的状态概率矩阵为

$$P(2) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \frac{4}{9} & \frac{5}{9} \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \left[\frac{4}{9} \ \frac{5}{9} \right]$$

因此后年的生态产量为歉年的概率是 $4/9 = 44.4\%$; 为丰年的概率是 $5/9 = 55.6\%$ 。可见丰歉可能性都有,以丰年的可能性为大,而要争取实现丰产,则要从人工生态动力源入手,比如增加有机肥投入以满足营养生态动力源,加强水分保障,以满足水文生态动力的需要,这样的优化控制,可确保生态产量增加。

第六节 集对分析及新集对论在生态控制中的应用

集对分析(set pair analysis)是我国浙江诸暨市联系数学研究所赵克勤提出的处理不确定性的新的系统理论方法。这种方法近年已在不少领域试用,受到了好评。如张学文研究员指出:“赵克勤发明的联系度公式,好似把一些性质、关系等抽象的含义用一个公式计算成一个值。小心、巧妙地利用它,会给我们打开一个新的领域。”(引自全国集对分析研究会主办的《集对分析与联系数学通讯》2001年第1期)。在生态控制的诸多问题中,事实上涉及多方面的问题,如植物的生态产量控制、动物体重增量的控制、生态县开发方案的控制、全球生态系统与二氧化碳排放量的优化控制等,它们各自的性质千差万别,而它们之间的联系却千丝万缕。这些都已经为生态学诸多且往往是分别处理的专门研究所证实。比如生态县建设,目标是林茂粮丰,六畜兴旺,山川秀美,并且保持全县生态环境长期优化,利于可持续发展,这些内容的含义,用一个公式计算出一个值,原有的经典数学方法,似比较困难。因此,我们建议不妨用集对分析和后来张鸣博士与王光远院士(2000)提出的新集对论,加以试研究。下面,让我们简述有关原理和生态试运用途径。

一、集对分析基本原理及各生态县生态控制水平级别评估

集对分析是建立在联系度及其数学表达式基础上的,集对分析是对不确定性和确定性作为一个系统进行综合考察的。由于生态控制问题正是不确定性和确定性都存在的一种特殊系统,所以集对分析的基本原理乃至将来提出的一些新的原则,运算规则,在生态控制中,都是应当有用的。

下面让我们首先简介联系度及其数学表达方法。

设根据问题 W ,对集 A 和集 B 组成的集对 H 展开分析,共得到 N 个特性,其中有 S 个集对中的两个集合所共有,这两个集合又在另外的 P 个特性上相对立,在其余的 F 个特性($F = N - S - P$)上关系不确定,则在不计各个特性权重的情形下,称

S/N 为集 A 与集 B 在问题 W 下的同一度,简记为 a ;

F/N 为相应的差异度,简记为 b ;

P/N 为对立度,简记为 c 。

由于同一度、差异度、对立度是从不同侧面刻画两个集合的联系状况的,所以总的联系状况 $\mu(W)$ 可以表示为下式:

$$\begin{aligned}\mu(W) &= \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \\ &= a + bi + cj\end{aligned}$$

式中, i 为差异不确定度的系数,在区间 $[-1, 1]$ 内,视不同情况取值, i 也可以仅起标记作用; j 为对立度的系数,其值为 -1 , j 同样也可以起标记作用; μ 为联系度,当用其刻画某一数字时,称之为联系数。

由以上的定义和论述可知,联系度表达式一式三量,同时体现出三者的联系、影响与转化。当 i 为 1 时,不确定度转化为同一度; i 为 -1 时,则转化成对立度;当 i 在区间 $(-1, 1)$ 内取值时,则不确定量中,同一与对立各占有一定的比例。联系度 μ 与不确定性系

数 i 是集对分析理论的基石。该理论包容了随机模糊和灰色等常见的不确定性。

在生态县生态控制级别(指人工生态动力源所起作用控制,分为优、良、差三级)中的应用,可对不同县不同发展项目分别评价。为使评价标准统一起来,对一年生植物的生态产量、动物和多年生植物的生态增量,都换算成价值(以元为单位),以资比较。设在某一个自然生态动力源大体相近的区域内,有四个生态县,它们共同发展的生态大农业项目中有 6 大项:①平原种植(一年一熟);②草地放牧;③山区药材;④水库(池塘)养鱼;⑤果树育苗与生产;⑥温室蔬菜。

设在某一年,对各县生态控制级别加以评估。对每种生态农业项目,都有级别指标。该年达标,视为“实际”与“标准”两个级别“共有”,“相对立”和“不确定”关系,按前述定义处理,对于 4 个县(用 1,2,3,4 为下标)的生态控制级别的集对分析联系度为

$$\mu_1 = \frac{3}{6} + \frac{2}{6}i + \frac{1}{6}j = 0.500 + 0.333i + 0.167j \quad (6-20)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{6} + \frac{2}{6}i + \frac{3}{6}j = 0.167 + 0.333i + 0.500j \quad (6-21)$$

$$\mu_3 = \frac{2}{6} + \frac{2}{6}i + \frac{2}{6}j = 0.333 + 0.333i + 0.333j \quad (6-22)$$

$$\mu_4 = \frac{0}{6} + \frac{3}{6}i + \frac{3}{6}j = 0.000 + 0.500i + 0.500j \quad (6-23)$$

联系度表达式计算形式为 $\mu_1 \textcircled{1} = 0.75 + 0.25i + 0.00j$ 的一系列表达式,计有

$$\begin{aligned} &\mu_1 \textcircled{1}, \mu_1 \textcircled{2}, \dots, \mu_1 \textcircled{6} \\ &\mu_2 \textcircled{1}, \mu_2 \textcircled{2}, \dots, \mu_2 \textcircled{6} \\ &\vdots \\ &\mu_4 \textcircled{1}, \mu_4 \textcircled{2}, \dots, \mu_4 \textcircled{6} \end{aligned}$$

经指标平均后,可得 $\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3$ 和 $\bar{\mu}_4$, 将它们分别代入相应的权重系数处理式(6-20), (6-21), (6-22)和(6-23), 并经归一化处理后,可得 μ'_1, μ'_2, μ'_3 和 μ'_4 , 比如

$$\mu'_1 = 0.723 + 0.277i + 0.000j$$

该式表明:第一个县属于“优”级生态控制水平的可能性为 72.3%, 属于“良”级为 27.7%, 属于“差”级为零。这样,对 4 个生态县的控制水平,可以作出定量评估,并进行比较,以利于次年的进一步决策,即优化人工生态动力源。

从以上简例可以看出,其计算步骤简单,只是算术四则运算。但如果针对生态建设项目多,待比较的单位很多,手算起来,量就大了。所以可用计算机程序运算,参考赵克勤原著很容易设计出不同语言的软件,运算机时也不多。

二、新集对论在生态控制中应用:生态建设项目评价

集对分析自提出以来,已有不少应用,但从理论上,尚有许多问题待进一步加以探讨。张鸣和王光远指出:“集对”中的两个集合的元素数目不必要限定为“相等”,这样可拓广集对论的应用范围;两集合元素间的对比应当在元素序偶中展开,而非对应元素的直接比较,对比方式应当采用“是否符合某种关系”来进行,基于上述目的,他们提出关于“集对”、“联系度”的新的数学定义,给出了联系度的运算规则。这种新集对论,似有比赵克勤专著新论,有所进展。我们考虑其在生态建设工程评价中可予试用,这是生态控制

应用的一个方面。详细的定义推导过程,运算法则,这里不一一讲述,必要时参考原著。

设有某一生态建设工程项目,有 A 和 B 两个方案,由 10 位专家组成的专家集 M 对该两种方案进行评定选择。评价因素包括:地貌改造措施(如填平霜穴)、土壤改良措施(如改造盐碱地)、小气候改善措施(如植树造林)、水资源改造措施、生物结构调节措施(如退耕还林、退耕还草)。专家集与两个方案的因素集组成两个集对序偶集 $H(A, M)$ 和 $H(B, M)$,问题是:各位专家对方案中因素的具体状况所持的态度如何? 设“赞同”用符号“√”表示,反对用符合“×”表示,“弃权”用“~”表示,则序偶集 $H(A, M)$ 和 $H(B, M)$ 中元素间的关系,由专家给出,分别见表 6-6 和表 6-7。

表 6-6 各位专家对方案 A 的评价 $H(A, M)$

		专 家 集									
		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}
方案 A 因素集	地 貌	√	√	×	√	~	√	√	×	√	√
	土 壤	~	√	√	√	√	×	×	~	√	√
	气 候	√	√	~	×	~	√	√	√	√	~
	水资源	√	~	√	√	√	~	~	√	√	√
	生 物	×	~	~	~	√	√	√	√	×	×

表 6-7 各位专家对方案 B 的评价 $H(B, M)$

		专 家 集									
		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}
方案 B 因素集	地 貌	~	×	×	√	~	√	√	×	√	√
	土 壤	~	√	√	√	√	×	×	~	√	√
	气 候	√	√	~	×	~	√	√	√	~	~
	水资源	√	√	√	√	√	~	~	√	√	√
	生 物	√	√	√	√	√	√	√	√	×	√

由表 6-6 和表 6-7 可以看出: $H(A, M)$ 和 $H(B, M)$ 的基数 $N = mn = 50$, $H_f(A, M)$ 的基数 = 30, $H_f(B, M)$ 为基数 = 33, $H_{\bar{f}}(A, M)$ 的基数 = 12, $H_{\bar{f}}(B, M)$ 的基数 = 10, $H_{\bar{f}}(A, M)$ 的基数 = 8, $H_{\bar{f}}(B, M)$ 的基数 = 7。由集对序偶集,经过计算(过程略),得对两个方案评价的同异反联系度为

$$u(A, M) = \frac{30}{50} + \frac{12}{50}i + \frac{8}{50}j = 0.60 + 0.24i + 0.16j$$
$$u(B, M) = \frac{33}{50} + \frac{10}{50}i + \frac{7}{50}j = 0.66 + 0.20i + 0.14j$$

由联系度优先关系可知,方案 B 优于方案 A。

三、生态环境质量评估的同异反态势排序方法

同、异,正、反,确定与不确定,是自然界中的一种对立统一的基本现象,这种现象尤其广泛地存在于人类生态环境之中。充分认识生态环境的质量,尤其是充分理解人类活动生态动力源对环境控制的效果,对于有目的地、科学地控制生态环境有重要意义。但

是,由于人类生态环境特别复杂,控制措施又多种多样,以致全面评估生态环境质量成了难题。以前的作法,一是就某一具体事例的评估,如大气中 SO_2 含量变化等,但这很难估价单一要素的变化对农、林、牧、卫生等的综合作用;另一种是主观描述,比如说某城市绿地面积增加,有利于生态环境改善,这缺少量的概念和比较概念,如果我们能想出办法,就几个用不同方法表达的同一地区不同地块环境质量进行评估,则能满足人们对环境质量分析之要求,为优化控制服务。

蒋云良(2001)在教育方面,用集对分析作过研究,所用思路和方法是可以用于生态质量评估的。

基本原理是:同异反态势排序是根据同异反联系数 $a + bi + cj$ 中的 a, b, c 的大小关系而进行的一种排序,其全排序由一个具体表格一一给出(蒋云良,2001)。比如说:如果 $a > c, b = 0$, 定为“准同势”,其意义是:系统有确定的同一趋势;如果 $a > c, b \geq c, b < a$, 定为“弱同势”,其意义是:系统的同一趋势比较弱;

如果 $a > c, a \leq b$, 为“微同势”,这样共有 12 种情形。

例如,在生态环境质量评价中,用 9 个项目分别评价 42 个单位(比如 42 个生态村),这 9 个项目是:草地面积,湿地面积,鱼塘或水库,中药材产地,高秆农作物,果树,蔬菜,飞播造林成活状况,海涂生态状况等。

由专家分别打分后,按约定,实际分数为优(81~100 分)者,属于“同”,中等(60~80 分)属于“异”,差(59 分以下)属于“反”。这样,对于每一个项目,都能确定出一个联系数。比如,对于第一个项目——草地面积——来说,所得 b 为 0.70, c 为 0.07, a 为 0.17;其关系是: $a > c, a \leq b$, 判定为“微同势”。根据 a, b, c 的值可评价其他项目,并从中分析出各种趋势特点。

参 考 文 献

- 于系民. 1999. 霜期农业气候学. 北京:气象出版社.
- 方开泰、马长兴. 2001. 正交与均匀试验设计. 北京:科学出版社.
- 孙安健. 1986. 世界气候. 北京:气象出版社.
- 杨锦忠. 2001. 刈草高度对草丛群体特征的影响的研究——典型变量分析在草地生态系统研究中的应用. 生物数学学报, 16:109~113.
- 张 本主编. 2002. 虾类养殖研究. 北京:海洋出版社.
- 张 鹏、王光远. 2000. 新集对论. 哈尔滨建筑大学学报, 22:1~5.
- 赵克勤. 2000. 集对分析及其初步应用. 杭州:浙江科学技术出版社.
- 莫本田等. 2001. 不同刈割方式对苇状羊茅混播草地生产性能的影响. 四川草业, 1:24~27.
- 黄克中等. 1987. 随机方法与模糊数学应用. 上海:同济大学出版社.
- 裴铁璠等. 1999. 自然灾害非参数统计方法. 北京:科学出版社.
- 裴铁璠等. 2001. 生态动力学. 北京:科学出版社.
- 霍成君等. 2001. 刈割期和留茬高度对温暖草地产草量及品质的影响. 草地学报, 9:257~264.
- Atkinson, A. C. et al. 1992. *Optimum Experimental Designs*. Oxford: Oxford Science Publications.
- Baille, A., Mermier. M. et al. 1980. Utilisation des eaux de rejet en agrivulture. II. Modifications micro-climatiques dues à l'irrigation à l'eau tiède. *Agric. Meteorol.*, 22: 85~91.
- Berg, P. et al. 1998. A comparison of mating designs for inference on genetic parameters in fish. *Proceed-*

- ings of the Sixth World Congress on Genetic Applied to Livestock Production , Amidale, Australia, 11~16th ,January, **27**:115.
- Cocuzza, G. E. , Clercq, P. , Lizzio, S. , Van De veire, M. , Tirry, L. , Degheele, D. and vacante, V. 1997. Life tables and predation activity of *Orius laevigatus* and *albidipennis* at three constant temperatures. *Entomologia Experimentalis et applicata* , **85**: 189~198.
- Dugatkin, L. A. 1997. *Advances in Game Theory and the Study of Animal Behaviour* . Oxford: Oxford University press.
- Dupont – Nivet, M. *et al.* 2002. Optimization factorial mating designs for inference on heritability in fish species. *Aquaculture* . **204**: 361~370.
- Fang, K. T. *et al.* 1994. *Number – Theoretic Methods in Statistics* . London: Chapman and Hall.
- Fang, K. T. *et al.* 2000. Uniform Design: Theory and Applications. *Technometrics* , **42**: 237~248.
- Kokita, T. *et al.* 2001. Sexual confeid over mating system: the case of a pair – territorial filefish without parental care. *Animal Behaviour* , **62**: 147~155.
- Krieg, F. *et al.* 1999. Isolation of microsatellite loci in European catfish. *Silurus granis*. *Mol. Ecol.* , **8**: 1957~1969.
- Moutonnet, P. , Wery, J. , Bossy, A. *et al.* 1981. Etude comparative de quatre dispositifs d'irrigation automatique: application au ma? s irrique en localisé. *Agric Meteorol.* , **24**: 275~289.
- Rao, P. V. 1980. Determination of a growth – environment relationship in jute (*Cochrus olitorius* L). *Agric. Meteorol.* , **22**: 45~52.
- Sanchez, J. A. and Lacasa, A. 2002. Modelling population dynamics of *orius laevigatus* and *O. albidipennis* (Hemiptera: Anthocoridate) to optimize their use as biological agents of *Frankliniella occlidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Bulletin of Entomological Research* , **92**: 77~88.
- Sanchez, J. A. , Alcazar, A. , Leamas, A. , Lacasa, A. and Bielza, P. 2000. Integrated pest management strategies in sweet pepper plastic houses in the southeast of Spain. *Bulletin OILB Srop* , **23**: 21~30.
- Seligman, N. G. , van Keulen, H. and Spitters, C. J. T. 1992. Weather, soil conditions and the interannual variability of herbage production and nutrient uptake on annual Mediterranean grasslands. *Agric. For. Meteorol.* , **57**: 265~279.
- Sharratt, B. S. , Baker, D. G. , Wall, D. B. , Skaggs, R. H. and Ruschy, D. L. 1992. Snow depth required for near steady – state soil temperatures. *Agric. For. Meteorol.* , **57**: 243~251.
- Sih, A. *et al.* 2001. Optimal diet theory: When does it work, and when and why dots it fail? *Animal Behaviour* , **61**: 379~390.
- Smith, H. G. *et al.* 1998. Intersexual competition in a polygynous mating system. *Oikos* , **83**: 484~495.
- Wootton, R. J. 1998. *Ecology of Teleost Fishes* (2nd ed.). Dordrecht: Kluwer Academic.

第七章 非清晰生态控制

从前面几章的论述可知,在生态控制的定量方法中,无论是确定性或是随机性的,均是使用清晰的方法处理着清晰的生态控制问题,并且总是在用清晰的指标,追求其清晰的结果。比如森林覆被率、林草的比例、向大气中排放的 CO_2 量,以什么样的数量为最佳?动物在什么条件下能得到最佳生态动力源?这些似为清晰的结果,事实上也是不够清晰的。何况那些至今争论颇多,本来就不清晰的问题呢!本章将论述生态控制中若干非清晰问题。

第一节 非清晰问题及其控制原理

清晰和非清晰是一个问题的两个方面。这是在哲学上已被公认的客观真理。生态控制中,例子比比皆是。

植物、动物(包括人)和微生物,都依赖必不可少的生态动力源才得以生存。但所需的标准,是否能满足这些依赖生态动力源的生物的要求,则不是一个清晰的问题。关于人的生态动力源,人们一直是很重视的,只是过去很少从生态动力源的角度来认识这个问题。因为人从远古时代到现代文明,为了生存,总要衣食住行这样一些基本条件,必要的生存环境和空间,否则即使遗传基因条件再好,也是无法生存于自然界中。“民以食为天”和“安得广厦千万间,大庇天下寒士尽欢颜”这样的名词名句,从生态动力学上解析,就分别指“营养生态动力源”和“人工控制环境中的气象生态动力源”。因为人没有吃的(食饵),就会饥饿,不能生长发育;如果茅屋为秋风所破,没有房住,就要挨冷受冻,难以生存,当然无欢颜所谈。在没有农耕的时代,民以“天”为“食”,主要食饵是狩猎所得到的猎物,而在有稼有穡的时代,粮食则成为主要食饵之一。是从什么时候开始,人们在食饵控制上达到充足了呢?这本身就是一个非清晰的问题,即使到现代,人与动物生态学家也难以清晰地说明动物性食品与植物性食品,以何种比例为宜。再说,住的问题,在没有温度测试时代,只能凭感觉说房间冷暖,但以什么程度为宜,也不是一个清晰的概念。当然这里所说的非清晰并非绝对不清晰。随着科学技术发展,人类认识水平的提高,在总体上会有清晰科学认识的,比如人每天平均摄取多少营养能生存,室内温度大体保持多少度,对人适宜等。但严格地说,处于边缘上的认识,往往是不清晰的。如多种动物、植物和微生物,以及某些品种其营养如何满足,其环境如何调节为宜,有许多是不清晰的。

从宏观上,全球生态学问题中,不清晰的问题更多。从不清晰到清晰,是客观存在的。比如,有许多自然生态现象,人们总是希望找到其周期性的。但生态控制方面的周期性,不像地学,更不像天文学那样容易找出,有许多自然现象,由于客观周期受多因素制约,或许没有周期性,或许有,但迄今未被人们发现。在天体运行方面,人们发现过许多客观存在的周期,如我国早就认识到的二十四节气,反映地球绕太阳的运动周期,哈雷彗星等出现规律,地学上潮汐的周期性等等。但在气象上,人们期望存在的天气周期,如

正月十五下雪和八月十五阴天的关系,事实上并没有周期关系,又如太阳黑子有 11 a 周期,人们也曾研究过气候是否也有 11 a 周期,但事实证明并没有。周期的混沌性是 Lorenz 在研究天气时认识到的,现在人们发现在物理学、生物学包括生态学中有许多混沌,这也是非清晰性的一种体现。以上说明生态学中非清晰问题的本身,给人们进行生态控制造成的非清晰是广泛的、客观的。

但非清晰又是相对的,如果条件放宽,非清晰的认识,就是清晰的了,所以没有绝对的清晰。

清晰性和非清晰性,作为不同的两个范畴,各有各的特点,各有各的规律。敏感地依赖于生态动力源是生态非清晰现象的主要特征。例如,在物候研究中,讨论一种指示植物(一般是野生植物),何时开花,是下一步实行合理调节播种期(系从时间上,实际农业生态控制的决策)的关键。从原则上说,某种植物何时始花,回答说在春季,总是基本正确的,但那样的答案,跨时段太长,对于生态控制是没有意义的。所以具体用于生态控制,“春季”二字的答案太笼统了。比如说,关于桃树开花,在北方某一区域,肯定答案是春季,即此时的解是确定的、唯一的,按气候四季标准,候均温 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,对于不同地方,都是以此作为春季,而不是一定回答在哪个月份。如果问桃树盛花在哪个月份?在中国大陆的不同地方,从华南到东北,可能在 3 月、4 月或 5 月,此时的解有三种选择;如果问桃花盛开在哪一个周?可能的答案是上述 3 个月中的 12 个周,此时的解域就有 12 个元素;如果问开花在哪个日子,解域就有 $7\times 12=84$ 个元素;如果问开花在哪个小时,解域就有 $24\times 84=2016$ 个元素。而以桃树开花为指标决策某种作物最佳播期,是充分利用自然条件的生态控制手段,这又与作物种类有关。与作物种类建立起关系的决策,才是生态控制的解域;比如 84 个日期,若结合三种作物,则解域比开花扩大为 3 倍,即有 $84\times 3=252$ 个元素。依此类推下去,解域中可能的解越来越多,解对初始条件的依赖性就越来越明显地显现出来,这就是非清晰现象。这种非清晰现象,是客观存在的,在目前多用 Lorenz(1963)提出的混沌(chaos)、Zadah(1965)提出的模糊数学(fuzzy mathematics)或邓巨龙(1982)提出的灰色系统(grey system)加以描述。

一、非清晰的相对性

前面所述的客观问题之中,已暗示出非清晰的相对性。比如说,春季桃花盛开,这就是一个相对概念,一般说来,如果从一个大的时段范围来认识,这是绝对的,即开花肯定是在春季。但春季这个概念本身的非清晰性,又使问题成了非清晰。天文日历上的春季(就北半球)系指按日地关系确定的 3 月 1 日至 5 月 31 日(含),如果按这个春季的概念处理,在我国南岭以南,桃树可能在 3 月 1 日以前开花,这岂不是冬季开花了?而黑龙江北部可能在 6 月初开花,这岂不是夏天开花了吗?这样说天文春季与开花,也是非清晰的,而社会公众的春季概念,往往不脱离天文春季。气候上的春季,却是以温度来划分的,这有时在有些地方与天文春季有较大区别,这就使日历上的开花日期差异大,而按温度却差异不大,因为无论是在北疆,还是在岭南,开花日期是温度的函数,从这个物候指示上看,清晰占主要地位,非清晰是相对的。

二、非清晰与清晰的转化

转化性的存在,与非清晰的相对性分不开。在生态控制问题中,可以举出地域方面

的例子。作物种类和品种界限的控制是大范围农业生态控制的富有实际意义的举措。生态研究者对这种地域界限的控制,应以有事先预知能力为佳,至少也能客观解释控制界限的生态原因。比如冬小麦北移,可种植与不可种植的界线是非清晰的,如果这样说的话,这种非清晰界线,往往不是绝对的。比如,在 20 世纪初,在我国东部,曾以京津为北界,这样在“保定温度适宜越冬”就是清晰的,“锦州温度不适宜越冬”,也是清晰的,但欲在京津一带画出一条线,即使能画出,也是非清晰的;随着品种的改进,耐寒力增强,冬小麦北界移至锦州至大连一线,这样,“京津一带的温度适宜越冬”就是清晰的了,而锦州至大连的一条分界线的走势,就是非清晰的了。但是,北种南引,中国冬小麦北界大概到铁岭一带,此时,“锦州至大连一线的温度适宜越冬”就是清晰的,而穿过铁岭的一条分界线走向如何,就成为非清晰的了。

三、非清晰方法的独立性和不可代替性

非清晰数学方法,与传统数学理论是有联系,但又有区别。在生态控制研究中,容易混淆的是概率论与模糊数学(或灰色系统)。在随机生态控制那一章中,我们可以看到:概率论是表示偶然现象规律的一门成熟的在生物方面有广泛应用领域的数学分支。但是,正如任何一门学科都有其局限性一样,概率统计方法在生态控制中的应用,也有它的局限性。概率尽管表示偶然,随机性,但在一定条件下,一般是在一定的置信水平下,都能得出一个比较确切的结果,或者说清晰的结果。但在生态控制问题中,往往使研究者下述一类问题,感到困惑。一个不稳定的系统,一个涉及人为生态动力源的系统,由试验数据推测出来的概率稳定性规律,常常遭到破坏。此时,传统概率方法应用的合理性、有效性,就值得怀疑了。面临上述问题,人们不得不寻找概率论等经典数学以外的新的数学方法。

概率论是研究和处理随机性生态控制现象与规律的一种生态数学方法;而非清晰的一些数学方法则是用于研究和处理具有模糊、灰色和混沌性质的生态控制的新方法。随机性是因果律的破缺而造成的一种不确定性。非清晰性是排中律的破缺而造成的一种不确定性。概率论是从不充分的因果关系中去把握广义的因果率——概率规律,非清晰的数学方法是从中介过渡性中寻找非中介倾向性,比如模糊数学中的隶属度。

第二节 模糊生态控制

今天人们对模糊数学的认识是越来越清楚了。刘应明院士所说的“模糊性——精确性的另一半”一语道破了模糊数学的本质。其实,精确与模糊本是一对矛盾,在包括生态控制在内的许多具体情况下,有时要求精确,有时却要求模糊。众所周知,在 Zadeh 以前,传统数学一味追逐的精确又精确,而在其加进模糊数学的内容,将更加有利于思维能力和科学素质的培养。事实上,在生态控制的许多问题中,是存在着模糊性的,如果用精确的数学模型处理之,则是不合理不客观的。我们的想法是,对生态控制问题作具体分析,该用什么模型就用什么模型。本节只概括几个有代表性的模糊问题,加以说明和阐述。在智能领域中的应用,将在第九章提及。

一、用模糊统计对生态动力源控制方案的评估

模糊统计是通过实验来确定隶属频率的方法,它假定试验的要素有如下四个:

- (i)论域 U ;
- (ii)论域中的一个固定元素 u_0 ;
- (iii) U 中可变动的普通集合 A^* ,它联系着模糊概念 a 与模糊子集 A ,每一次固定,是对 U 的一次划分;
- (iv)条件 S ,联系着对模糊概念 a 所进行的划分中的全部客观因素或心理因素,而对 A^* 的运动方式有所制约。

S 没有把划分限死,因而 A^* 可以变动,也许覆盖 u_0 ,也许不覆盖 u_0 ,以致 u_0 对 A^* 的隶属关系不确定。模糊统计认为:这种隶属关系的统计结果是 u_0 对 A 的隶属函数值的近似,用确定方法来研究这种不确定性。

这种确定方法是:每一次试验中, A^* 是取定的普通集合,在各次试验中, A^* 是变动的,而 u_0 固定,作 n 次试验,计算出 u_0 对 A^* 的隶属频率,以它们作为 u_0 对 A 隶属函数值的近似。表示这种频率的公式是

$$f_n \triangleq \frac{\text{“}u_0 \in A^*\text{” 的次数}}{n}$$

(7-1)

实践证明:随着 n 值的增大,此隶属频率会稳定于某个数。此数即可当作 u_0 对于模糊子集 A 的隶属函数值。

在实际应用中,常需进行模糊识别,从多种可能的隶属函数中挑选出最合适者。最简单且最直观的识别方法是运用最大隶属原则。

给定对象 $x \in U$ 。设 $C_i (i = 1, 2, \cdots, c)$, 是 U 上的 c 个模糊子集,隶属函数值 $C_i(x)$ 均已知。

如果某个 k 满足

$$C_k = \bigcup_i C_i(x)$$

(7-2)

则判定

$$x \in C_k$$

下面让我们举出一个例子,来阐述人为调控生态环境设计方案的评估问题。假定,根据所要研究的问题我们请来的专家共有 20 人。

由这 20 名专家对方案进行评估,分为优秀、良好、一般、较差、不能采用等共五种标准。用模糊集统计运算得出如下的隶属函数值:

模糊集	隶属函数值
优秀	0.17
良好	0.28
一般	0.39
较差	0.50
不能采用	0.52

专家评定次数结合对评语的意见列于下表:

	对评语的意见			
	恰当	较合适	较不合适	绝对不行
优秀	1	4	6	1
良好	2	5	3	1
一般	4	5	2	0
较差	9	2	0	0
不能采用	9	2	1	0

经过讨论与计算,对“恰当”、“较合适”、“较不适合”、“绝对不行”四种印象分别赋予的权重依次是 0.65,0.25,0.10 和 0.00,视上表中的次数为专家组的分。然后计算每一个评语的带有权重的综合分,得出如下结果:优秀, $1 \times 0.65 + 4 \times 0.25 + 6 \times 0.10 + 1 \times 0.00 = 2.25$;良好, $2 \times 0.65 + 5 \times 0.25 + 3 \times 0.10 + 1 \times 0.00 = 2.85$;一般, $4 \times 0.65 + 5 \times 0.25 + 2 \times 0.10 + 0 \times 0.00 = 4.05$;较差, $9 \times 0.65 + 2 \times 0.25 + 0 \times 0.10 + 0 \times 0.00 = 6.35$;不能采用, $9 \times 0.65 + 2 \times 0.25 + 1 \times 0.10 + 0 \times 0.00 = 6.45$ 。

以每一评语的总次数为分母,以上述综合为分子,计算出来的结果即可作为该项目对每一评语的隶属函数值。其结果如表 7-1 所示。

在此例的模糊统计中,联系着 5 个模糊子集,每一子集相应于一评语,评语全是模糊概念。每位专家的意见联系着可变动的普通集合 A^* 。

表 7-1 评语隶属函数值的计算

评语	综合分	次数	隶属函数值
优秀	2.25	12	0.1875
良好	2.85	11	0.2591
一般	4.05	11	0.3682
较差	6.35	11	0.5773
不能采用	6.45	12	0.5375

利用最大隶属原则,识别出此方案的合适评语是“较差”或“不能采用”,所以对此控制方案,须重新设计,必要时可再行招标,遴选设计单位。

二、树种优选的模糊综合评判

营造生态林的目的主要是充分发挥其生态功能。所以,在其选种设计中尽量选择那些与所在地区(含不同土壤、气候、地貌、地势的地区)自然条件适应的生态效益好的树种,由于随着森林遗传育种水平的提高,培育出的种苗类别很多,而其对自然环境适应能力差异很大,自然条件本身所涉及的生态动力因子也很多,致使树种优选这一控制手段的掌握,变得扑朔迷离,非清晰性显而易见。为从中找到比较有参考价值的结果,用确定、随机统计等手段和方法,几乎是无法控制的。此时,用模糊数学中的综合评判方法,则可找出有一定科学依据的结果。在北方某地飞播造林现场服务中,曾对不同树种、不同立地条件作具体观测,在所得数据基础上、试作评判。下面举例说明该生态控制方法的原理和计算公式。

1. 原理

树种选择的模糊综合评判,采用模糊数学原理,考虑与被评判事物——造林树种

——有关因子作用后,对树种试验区内的有关情况作出评估,最后根据所得出的计算结果,给出优选树种。设因素集为 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, 其中 u_1 为单位面积生态材积量(其意义系指由生态动力因子共同作用形成的材积量,它与实际材积量的关系类似于生态产量与实际产量的关系), u_2 为树高, u_3 为树木改善生态环境可作用半径长度, u_4 为树龄,评价集为 $Y, Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$ 。设 x 到 y 的模糊关系为 $R, R: X \times Y \rightarrow [0, 1]$ 。用矩阵表示

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

式中, r_{ij} 是 R 的隶属函数 $u_{\underline{R}}(x_i, y_j)$, $r_{ij} \in [0, 1]$, 表示从第 i 个因子作出第 j 种评语的可能性。

根据试验的目的要求,求各指标权重:计算各因素的平均值(\bar{X}),标准差(S),变异系数(CV),再求其权重(M),以模糊关系 R 与因素模糊集 A 作综合评判 $B = A \cdot R = V$, V 值最大者为最优树种,余类推。

2. 试验与计算

用均匀试验法,对造林区,选有代表性的小区作试验,并跟踪测定反映生态动力因子的控制因子,测量土壤墒情、空气温度、土壤温度、土壤质地、风力、降水等。把上述 X, S 等评判指标代入如下隶属函数算式:

$$U(x_i) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7-4)$$

再依各性状变化程度确定 M 。

作矩阵复合运算得出综合评判矩阵 Q ,

$$Q = M \cdot R$$

对于计算结果进行比较,得出在试验区以樟子松为造林用最优树种。在实施飞播造林后 5~10 a,证实樟子松为主林种效果是最佳的。

三、模糊隶属函数——生态位与麦田调控

姚建民等(中国生态学会,1991)以模糊数学中的隶属函数表示麦田生态协调关系,从而为麦田合理调控提供量化依据。

1. 植物生态位实用性的量化方法:原理

考虑到生态位一词的解释并未形成一个被生态学家普遍接受的确定性概念,在该研究中只重点突出生物对生态动力因子有不同要求这一特点,认为某种植物(个体或群体)的生态环境为该种植物的生存、生长、繁殖所提供的生态位是指提供给该种植物的或可被植物利用的各种生态动力因子——光、热、水、气、土、生物等——和生态关系——喜光性、喜温性、耐旱性、需水量、 CO_2 、补偿点、需肥量、耐酸碱能力、抗病虫害能力等——的集合。

基于上述想法可知,植物种类、生态条件和生态关系是植物生态位的三要素,可用蔡文提出的物元表达式加以描述。

将生态位 N 记为

$$N = N(P, E_i, f_i) \quad (7-5)$$

式中, P 是植物名称, E_i 是生态条件, f_i 是生态关系函数。量化后的植物生态位量值的大小, 还应能合理地反映植物特征、特性与各种生态条件的协调状况, 协调状况好坏, 应与生态位值的高低一致。

当某种植物的主要特性有 n 个时, 记为 $(C_i)_n$, 而现实生态条件与之对应的量为 $(X_i)_n$, 并可进一步将生态关系的协调状况, 用模糊数学中的隶属函数精确地表示出来。

设 $X_i \in C_i$ 的隶属函数为 f_i , 并有 $0 \leq f_i \leq 1$, 那么有 $[f_i]_n = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ 。

由于生态位的高低是由多维生态关系共同决定的, 所以用生态关系隶属函数积来表示生态位量值大小则较为合理。这里把这种积的关系确定为生态位模 S , 并有

$$S = \prod_{i=1}^n f_i \quad (7-6)$$

式中, $0 \leq S \leq 1$ 。

按照生态因子或生态关系是否具有可调控性, 式(7-6)可以分解为

$$S = \prod_{i=1}^l f_i \cdot \prod_{i=l+1}^n f_i \quad (7-7)$$

式中, $i=1, 2, \dots, l$ 为可调控因子或关系; $i=l+1, l+2, \dots, n$ 为不可调控因子或关系。

如果考虑到时间因子, 用平均生态位模 $\bar{S}(t)$, 它反映某种植物在某一时段的生态位高低。 $\bar{S}(t)$ 可用积分式表达为

$$\bar{S} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} S(t) dt}{t_k - t_0} \quad (7-8)$$

有时, 为计算方便起见, 可用总生态位模 \hat{S} 进行粗略估计。

其公式为

$$\hat{S} = \prod_{i=1}^n \hat{f}_i \quad (7-9)$$

2. 实例

为了对植物生态位的上述量化方法进行合理的验证, 姚建民等用在山西省临猗县李汉乡和三管乡取得的农户小麦生产状况资料, 进行了小麦总生态位模的实例计算及其分析。

所选用的生态因子有: 日照时数、 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温、 CO_2 浓度、供水量、供肥量、土壤 pH 等。参考有关资料, 给出在当地亩产 500 kg 小麦的理想生态条件的量值, 测定了两个农户麦田生态条件的实际供应量, 从而得出各生态因子的隶属函数值和总生态位模的计算值, 并与两户的麦田产量作了比较。

据测定, 李汉乡南越兵一家的小麦的总生态位模为 0.3639, 亩产小麦 389 kg; 而三管乡王雪峰一家的小麦总生态位模为 0.3255, 亩产为 186 kg, 可见, 生态位模值与产量水平有明显的关系, 进一步分析, 可揭示出产量限制因子, 利用实现人为的合理调控, 进行科学的田间管理。

从以上分析可见, 生态位量化理论同模糊数学中的隶属度结合, 对于优化田间控制, 具有一定意义的。可以推广到不同的植物, 也可进一步用于动物、微生物等。模糊数学与多项生态方面原理、概念的结合应用, 是模糊生态控制发展的正确方向之一。

第三节 动植物生境的灰色控制

依据动植物与环境相适应的基本原理,减轻动植物生存的不利环境威胁,使其适应生存环境,为其创造优良生境,是生态控制基本目标。其中有许多问题属于灰色控制领域。因为我们对其过程既不是完全清晰,又不是完全看不清。灰色系统理论中的相应方法很多,这里结合有关动植物,从三个方面加以论述。

一、红松受害主生态动力源的灰色控制

森林是陆地生态系统的主体。加强森林保护,对于使林木免受或少受不利生态动力源的危害,其生态经济的意义是显而易见的。但危害森林的生态逆境千头万绪,什么才是其中最主要者,人们的认识一般还是属于灰色系统的。针对具体树种利用灰色分析技术找出致害的主要因子,是控制其害的前提。下面参考曹鸿兴(1988)的计算加以说明。

1. 问题的提出及资料来源

红松产于我国东北北部(含内蒙古),是小兴安岭和长白山区最主要树种之一。红松常受不利生态因子危害。为了防御和在一定程度上控制这些灾害,须从中找出主要生态动力因子,确定这方面的主生态动力源。在运用灰色控制系统方法之前,数量生态研究者需要根据以往的研究成果,初步确定因子类别。

多年实际观测和分析指出,红松主要受如下两种因素的影响:①气象条件,红松既不耐旱,又不耐水湿,而旱和水湿主要是天空降水变化的问题。所以在这里,以灾害性天气发生率作为旱涝灾害的笼统指标。②鼠害,其危害主要产生于鼠类的啮食作用。所以,在这里以害鼠捕获率表示鼠害状况。表7-2系某地1965~1973年的统计资料。

表7-2 红松受害率及其影响因子(%)

年 份	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
害鼠捕获率 $x_1(k)$	30	5	5	20	5	14	23	5	3
灾害天气发生率 $x_2(k)$	20	12	8	10	12	7	12	10	5
林木受害率 $x_0(k)$	26	10	8	30	10	15	25	3	3

2. 计算过程与结果分析

由于参考序列 $x_0(k)$ (林木受害率)、比较序列 $x_1(k)$ (害鼠捕获率)和 $x_2(k)$ (灾害天气发生率)三者的数量级相同,故无须做无量纲化处理。

由表7-2易得

$$\begin{aligned} \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| &= |8 - 8| = 0 \\ (i &= 1, 2; k = 1965, 1966, \dots, 1973) \\ \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| &= |30 - 10| = 20 \\ (i &= 1, 2; k = 1965, 1966, \dots, 1973) \end{aligned}$$

取 $\zeta = 0.5$, 得关联系数

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

$$= \frac{10}{|x_0(k) - x_c(k)| + 10} \quad (7-10)$$

于是,我们得出关联系数序列:

$$\xi_{01} = \{0.72, 0.71, 0.78, 0.50, 0.71, 0.91, 0.83, 0.83, 1.00\}$$

$$\xi_{02} = \{0.62, 0.48, 1.00, 0.33, 0.48, 0.55, 0.44, 0.48, 0.83\}$$

最后,依公式

$$r_{0i} = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 \xi_{0i}(k)$$

$$i = 1, 2$$

求得

$$r_{01} = 0.752$$

$$r_{02} = 0.579$$

结果表明,鼠害对红松的危害比天气旱涝重要。再依表 7-2 资料给出图 7-1,可见 $x_1(k)$ 与 $x_2(k)$ 曲线差异甚大,后者与红松受害率大体同步,由几何直观判断也可见 $r_{01} > r_{02}$ 。

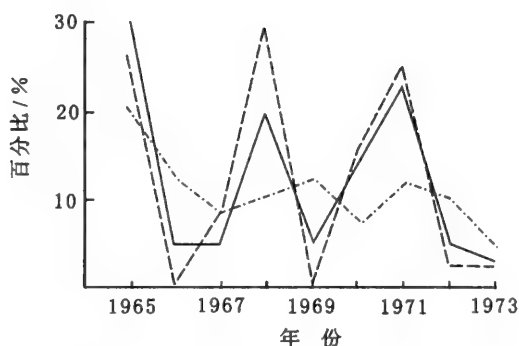


图 7-1 红松受害率及其因素的时间曲线图

— 红松受害率, --- 灾害性天气发生率, -·- 害鼠捕获率

上述的结果,对于确定出生物性的主生态动力源是有明显意义的。说明生物性危害超过非生物性的,这就是控制红松受害的生态措施的确定佐据。尤其是减轻鼠害措施比控制旱涝更为容易,这就是灰色控制的优越之处。而如果用试验统计方法再作大量试验后再统计,不但要历经多年,而且很难用方差分析得出合理结果。

二、营养生态动力源的控制

作物以及其他植物,一般是摄取 N,P,K 以及微量元素维持其生长发育的。所以研究肥效的生态问题,是调节营养生态动力的基础。优化控制施肥时间,在《生态动力学》一书中已有论述,而施肥所用元素组合与环境关系,前苏联有许多研究。在我国首创的灰色控制理论对施肥组合有着一定用途。李光林等运用灰色系统理论分析其盆栽试验,研究了大中微量元素对水稻产量和品质的影响,并作灰色关联评判。

1. 分析、计算过程

依灰色控制理论,步骤如下:

(1)标准参考数据列与指标的表示

标准参考数据列 X_0 由各项指标中的最优值组成,即

$$X_0 = \{x_{0j}\} \quad j=1,2,\cdots,6 \quad (7-11)$$

式中, j 代表测定指标,从 1 到 6 依次是:水稻产量、干物质重量、粗蛋白、淀粉、必需的氨基酸、氨基酸。

比较数据列 x_i (i 是处理号,从 1 到 16)由各参评项目的各项指标构成,即

$$x_i = \{x_{ij}\} \quad i=1,2,3,\cdots,16 \quad (7-12)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 个处理的第 j 个指标值。

(2)数据标准化处理

该处理的目的是使数据无量纲化,以便比较,所用公式是

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} = x_{0j} \\ \frac{x_{\max} - x_{ij}}{m_{\max} - x_{0j}} & x_{0j} < x_{ij} < x_{\max(i)} \quad i=1,2,\cdots,16 \\ \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{0j} - x_{\min}} & x_{\min(i)} < x_{ij} < x_{0j} \\ 0 & x_{ij} = x_{\min(i)} \text{ 或 } x_{ij} = x_{\max(i)} \end{cases} \quad (7-13)$$

式中, x_{0j} 为各项指标值的最优值。

(3)计算关联系数

$$\xi_{i(j)} = \min_i \min_j \Delta_{i(j)} + \rho \max_i \max_j \Delta_{i(j)} + \rho \min_i \min_j \Delta_{i(j)} \quad (7-14)$$

$$\Delta_{i(j)} = |x_{0(j)} - x_{i(j)}| \min_j \Delta_{i(j)} \quad (7-15)$$

式中, $\min_i \min_j \Delta_{i(j)}$ 表示在第一级最小差的基础上找出其最小差,同样 $\max_i \max_j \Delta_{i(j)}$ 表示二级最大差, ρ 是分辨系数。

(4)关联度计算

$$r_0 = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \xi_i \quad (7-16)$$

2. 最优控制组合

经由灰色关联综合评判,按关联度 r_0 值,最大为 0.8881 对应处理代号 1,次最大为 0.8052,对应处理代号 12。

现将每种组合施肥量(单位:mg·钵⁻¹、每钵土为 7.0 kg)列下。

(1)处理号 1——复₄S₁Fe₁Cu₁

该处理各元素量为:三元化成肥 6457.5,磷铵 266.9,硫铵 679.4,尿素 619.9,氯化钾 576.8,硫酸亚铁 1000.0,硫酸铜 46.2,硫酸锌 210.0,硅肥 2800.0。

(2)处理号 2——复₂S₂Fe₁Cu₂

该处理上述各元素量,依次为 4386.2,300.7,944.7,566.9,539.8,1000.0,79.8,210.00,2800.0。

不难看出,从各种方案中优选出营养动力源生态控制方案,有益于生态控制的定量化和规范化。盆栽结果,证实上述计算的正确值。配方施肥试验统计方法,有不少。关键是使试验有代表性,所以像本试验如按均匀设计的配方试验处理(本书第六章第一

节),结合灰色系统理论计算,或许会得出更好结果。这里的方法当可用于多种植物。

三、品种适应性:灰色局势决策初步应用

1. 目的意义

为了提高东北南部秋季主要蔬菜作物——大白菜——的单位面积产量,中科院某研究单位开展了区域品种试验,各参试单位在当地所得实验结果,主要用于当地的品种安排,即试验结果表明甲品种在某试验年(令为第 n 年)产量高,那么在翌年(即第 $n+1$ 年)就大面积种植那个品种。在试验初期的两三年都是这样做的。但这种做法,从科学上来看,显然有着不合理的成分。主要缺点是:①没有充分考虑生态动力因子的差异,即事实上肯定了第 $n+1$ 年和第 n 年生态动力源因子的一致性和所用供试暨推广品种的遗传基因的一致性。这样的肯定是否正确呢?答案是有正确的一面,也有不正确的一面。正确的方面是:假定种子纯度无大差异,前后相邻两年的遗传基因可视为基本一致,即品种本身的高产性,抗逆性没有什么明显的变化;从地貌、土壤和外界其他生物影响来说,这些生态动力源因子一般也无大变化;但是这两个方面的生态动力源因子可能有变化甚至会有大变化。其一,天气方面的生态动力因子,尤其是大白菜生育后期的温度,往往因寒潮来得早晚而变化较大,还有水量;另一方面,作为营养生态动力源的化肥施用量,施用方法,大面积与试验区往往有差异。所以,对试验资料的应用,应考虑一个很大的地理范围,不限于一乡一村。这就是说,在现阶段,在寒潮天气尚不能在种植前提前几个月预报的前提下,还不如只考虑气候条件,即多年平均状况,因为气候的变化周期比天气要长得多,在品种试验和推广的有限年内,不会发生突变。并利用生态产量数据,其优点,已如生态动力学指出的那样,从试验资料的分析方法上来说,以前的区域试验,主要用方差分析和回归分析。但都是只考虑单一因素的方法。后来常用的模糊综合评判和灰色综合评估,也只能是对一个试验点的资料作分析。但事实上,在农业自然资源相似的同一个区域内,相当多的生态动力源因子是有联系,甚至有密切关联,比如寒潮袭击,对于辽宁的西部和北部,总是同时的。邓巨龙提出的灰色局势决策,有利于克服上述缺点,在依据动力源条件作品种决策方面是合适的优化控制策略。

2. 基本假定和计算步骤

(1)灰色事件 a_i 和对策 b_j 的意义

令灰色决策事件为辽宁西部和北部的6个市: a_1 葫芦岛; a_2 锦州; a_3 盘锦; a_4 朝阳; a_5 阜新; a_6 铁岭。这里 $i=1,2,\dots,I$ 。对策为10个品种(有秋杂系列、辽白系列、锦州孙家湾系列),分别称为甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸,并用 b_j 依次表示为 b_1, b_2, \dots, b_{10} 。这里 $j=1,2,\dots,J$ 。

(2)构造灰色局势

试验共有 $I \times J = 6 \times 10 = 60$ 个局势。

它们分别是(葫芦岛,甲),(葫芦岛,乙), \dots , (葫芦岛,癸);(锦州,甲), \dots ; (盘锦,甲), \dots ; (朝阳,甲), \dots ; (阜新,甲), \dots ; (铁岭,甲), \dots ; (铁岭,癸)。显然,每个局势的意义都表示在某地大面积种植某品种。

(3)灰色目标及其权向量的确定

根据辽宁省西部和北部的生态条件和大白菜相应生产状况,确定5个灰色目标及其

加权向量:

(单位面积的生态产量,抗寒潮低温的能力,抗霜霉病的能力,耐贮能力,早熟性) = (0.60,0.15,0.07,0.07,0.11)。

(4)求白化值

根据由试验数据得出的各目标的白化值,按照公式

$$r_{ij}^{(p)} = \frac{u_{ij}^{(p)}}{\max_i \max_j u_{ij}^{(p)}} \tag{7-17}$$

构造各目标的局势效果测度矩阵。式(7-17)中, $r_{ij}^{(p)}$ 为按第 p 个目标在第 i 个市种植第 j 个品种的局势效果测度值, $u_{ij}^{(p)}$ 为按第 p 个目标在第 i 个市种植第 j 个品种的试验数据的白化值。

(5)计算效果矩阵

将灰色目标加权向量乘以各目标局势效果测度矩阵,得出加权效果测度矩阵。

(6)构造效果矩阵

根据

$$r_{ij} = \frac{\sum_{p=1}^p r_{ij}^{(p)}}{p} \tag{7-18}$$

将各目标问题综合化,构造综合效果测度矩阵 R 。式(7-18)中的 r_{ij} 表示局势 ij 条件下的综合效果测度值, p 为目标个数。

所得的矩阵结果是

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	
	(甲)	(乙)	(丙)	(丁)	(戊)	(己)	(庚)	(辛)	(壬)	(癸)	
$R =$	0.128	0.131	0.121	0.135	0.154	0.160	0.141	0.129	0.148	0.169	a_1 (葫)
	0.118	0.142	0.139	0.116	0.148	0.131	0.139	0.162	0.151	0.136	a_2 (锦)
	0.121	0.119	0.108	0.167	0.162	0.154	0.145	0.142	0.137	0.129	a_3 (盘)
	0.131	0.161	0.182	0.166	0.171	0.128	0.154	0.132	0.129	0.127	a_4 (朝)
	0.141	0.139	0.118	0.165	0.158	0.141	0.139	0.129	0.118	0.167	a_5 (阜)
	0.108	0.129	0.132	0.149	0.155	0.161	0.132	0.149	0.158	0.152	a_6 (铁)

3. 根据综合效果测度矩阵,指出最优局势控制结果

矩阵的 a_1 行中的最大值是 0.169,对应的局势是 (a_1, b_{10}) ,即在葫芦岛,生态动力条件最适宜种植品种癸;次大值是 0.160 对应的局势是 (a_1, b_6) 即在葫芦岛,第二个最适宜(次最适宜)的是品种己。同理,最不适合的是品种丙。

对于其他市,从矩阵中全可直接看出结果。

4. 实践检验:成绩和问题

由于灰色系统论的可靠性以及当地农业技术人员多年试验的科学性,使所得结论,比较符合一般的常年实际情况。存在的问题,主要是变动性很大的生态动力因子,如大白菜生育后期可能遇到的寒潮降温天气,在种植之前无法准确预测,所以特殊的不可抗拒生态因子影响须剔除,为了抗御突如其来的灾害,在品种利用这一治本措施方面的改进,可用运筹决策,如用 MDP 作决策,以达到时序总体的最优。

第四节 区域开发生态经济控制:灰色局势决策

根据一个区域的生态经济特征,从生态环境与区域开发优化协调的目的出发作出合理决策,是生态经济优化控制的一个重要方面。但在过去相当长的时期内,主观决策较多。这或者由于决策者不熟悉客观决策的数学方法,或者欲用的数学方法过于复杂,以致望而生畏,没有能力应用。而从邓巨龙提出灰色控制系统原理以来,使区域生态经济中的许多微观难题可以求解。王玉蓉在这方面所做的工作(见王松需等,1992)是有意义的,下面加以介绍。

一、多目标决策的数学方法——局势决策

1. 决策元、决策向量与决策矩阵

决策是事件、对策、效果三者的总称。

记事件为 a_i , 对策为 b_j , 其二元组合 (a_i, b_j) 称为局势, 记之为 $S_{ij} = (a_i, b_j)$, 意即用第 j 个对策去对付第 i 个事件的局势。

记局势及其效果测量 ν_{ij} 的全体

$$\frac{\nu_{ij}}{S_{ij}} = \frac{\nu_{ij}}{a_i b_j} \quad (7-19)$$

为决策元。

如果事件 a_1, a_2, \dots, a_n 中, 有对策 b_1, b_2, \dots, b_m , 则对于同一事件 a_i , 可以用 b_1, b_2, \dots, b_m 这 m 个对策去对付, 于是构成

$$(a_i, b_1), (a_i, b_2), \dots, (a_i, b_m)$$

等 m 个局势。这些局势相应的决策元可排成一行。于是构成决策行

$$\delta_i = \left[\frac{\nu_{i1}}{S_{i1}}, \frac{\nu_{i2}}{S_{i2}}, \dots, \frac{\nu_{im}}{S_{im}} \right] \quad (7-20)$$

式中, ν_{ij} 为局势 S_{ij} 的效果测度。

同样, 对于同一对策 b_j 也可用 a_1, a_2, \dots, a_n 去匹配, 其相应的决策元可排成一列, 便构成决策列

$$\eta_j = \left[\frac{\nu_{1j}}{S_{1j}}, \frac{\nu_{2j}}{S_{2j}}, \dots, \frac{\nu_{nj}}{S_{nj}} \right]^T \quad (7-21)$$

将决策行 $\delta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与决策列 $\eta_j (j=1, 2, \dots, m)$ 排列起来, 便构成决策矩阵, 记为 $M(\delta_i, \eta_j)$ 或简记为 M , 并有

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\nu_{11}}{S_{11}}, \frac{\nu_{12}}{S_{12}}, \dots, \frac{\nu_{1m}}{S_{1m}} \\ \frac{\nu_{21}}{S_{21}}, \frac{\nu_{22}}{S_{22}}, \dots, \frac{\nu_{2m}}{S_{2m}} \\ \vdots \\ \frac{\nu_{n1}}{S_{n1}}, \frac{\nu_{n2}}{S_{n2}}, \dots, \frac{\nu_{nm}}{S_{nm}} \end{bmatrix} \quad (7-22)$$

2. 效果测度

效果测度是各个局势所产生的实际效果进行比较的量度。它通常包括上限效果测度,下限效果测度和中心效果测度,如生态产值收益属于越多越好者,可采用上限效果测度,越少越好者,如生态建设投资、难度,可采用下限效果测度;而如降水量、温度等气象水文生态动力源因子,以适量为宜者,则常常采用中心效果测度。下面只讨论上限效果测度。

上限效果测度的计算公式是

$$\nu_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\mu_{\max}} \quad \mu_{ij} \leq \mu_{\max} \quad (7-23)$$

这里 μ_{ij} 为局势 S_{ij} 的实测效果, μ_{\max} 为局势 S_{ij} 的所有实测效果之最大值。

可以看出

$$\nu_{ij} \leq 1$$

3. 多目标决策

当局势有 n 个目标时,则记第 k 个目标的效果测度为 $\nu_{ij}^{(k)}$,其相应的决策元为

$$\frac{\nu_{ij}^{(k)}}{S_{ij}^{(k)}} \quad (7-24)$$

为此,有相应的决策向量 $(\delta_i^{(k)}, \eta_j^{(k)})$ 及决策矩阵 $M^{(k)}$, 这里

$$M^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\nu_{11}^{(k)}}{S_{11}} & \frac{\nu_{12}^{(k)}}{S_{12}} & \dots & \frac{\nu_{1m}^{(k)}}{S_{1m}} \\ \frac{\nu_{21}^{(k)}}{S_{21}} & \frac{\nu_{22}^{(k)}}{S_{22}} & \dots & \frac{\nu_{2m}^{(k)}}{S_{2m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\nu_{n1}^{(k)}}{S_{n1}} & \frac{\nu_{n2}^{(k)}}{S_{n2}} & \dots & \frac{\nu_{nm}^{(k)}}{S_{nm}} \end{bmatrix} \quad (7-25)$$

这样,多目标的局势决策综合矩阵 $M^{(\Sigma)}$ 为

$$M^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} \frac{\nu_{11}^{(\Sigma)}}{S_{11}} & \frac{\nu_{12}^{(\Sigma)}}{S_{12}} & \dots & \frac{\nu_{1m}^{(\Sigma)}}{S_{1m}} \\ \frac{\nu_{21}^{(\Sigma)}}{S_{21}} & \frac{\nu_{22}^{(\Sigma)}}{S_{22}} & \dots & \frac{\nu_{2m}^{(\Sigma)}}{S_{2m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\nu_{n1}^{(\Sigma)}}{S_{n1}} & \frac{\nu_{n2}^{(\Sigma)}}{S_{n2}} & \dots & \frac{\nu_{nm}^{(\Sigma)}}{S_{nm}} \end{bmatrix} \quad (7-26)$$

矩阵中的元素,按下式计算:

$$\nu_{ij}^{(\Sigma)} = \frac{\sum_{k=1}^N \nu_{ij}^{(k)}}{N} \quad (7-27)$$

4. 决策准则

决策即挑选效果最好的局势。由事件选择最好的决策,叫做行决策,而由对策匹配最适宜的事件,称为列决策。其具体方法是

(1) 行决策

对于决策矩阵 $M^{(\Sigma)}$, 在决策行 δ_i 中,取效果测度最大的元

$$\nu_{ij}^{(\Sigma)} = \max_j \nu_{ij}^{(\Sigma)} = \max \{ \nu_{i1}^{(\Sigma)}, \nu_{i2}^{(\Sigma)}, \dots, \nu_{im}^{(\Sigma)} \} \quad (7-28)$$

则称 $\nu_{ij}^{(\Sigma)}/S_{ij}$ 为行决策元, S_{ij} 为最优决策局势, 即 b_j^* 是对付事件 a_i 的最优对策。

(2) 列决策

与前类似, 在决策 η_j 中选择效果测度最大的决策元

$$\nu_{i*j}^{(\Sigma)} = \max_i \nu_{ij}^{(\Sigma)} = \max \{ \nu_{1j}^{(\Sigma)}, \nu_{2j}^{(\Sigma)}, \dots, \nu_{nj}^{(\Sigma)} \} \quad (7-29)$$

则称

$$\frac{\nu_{i*j}^{(\Sigma)}}{S_{i*j}}$$

为列决策元, S_{i*j} 为最优决策局势, 即 a_i^* 是对于对策 b_j 来说最适宜的事件。

于是, 可以依据行决策与列决策的结果, 建立优序化决策矩阵, 作择优决策。

二、长寿湖水域生态经济控制的灰色局势决策

王松霈(1991)指出:“用生态经济学的理论指导探索自然资源利用的规律性还是一件新的尝试。”在水文生态动力源比较适宜的区域, 为得出较客观的生态经济效益, 是这种尝试的一个较好的范例。

王玉蓉等将水域划分为 5 个小区作为事件集: {上游河道区 I, 大河缓流区 II, 湖心区 III, 大坝汇集区 IV, 小河滞水区 V}。

取下列对策集: {捕捞 b_1 , 放养 b_2 , 培育鱼种(含产卵场建设) b_3 , 库湾和网箱养鱼 b_4 , 水域种植 b_5 , 旅游 b_6 }。

取下列效果集: {生态效益, 环境质量, 开发潜力, 开发难度}。

对于各种对策的效果, 由专家(含有经验公众)评估, 采用 6 种定性评估: 最好, 好, 较好, 一般, 较差, 最差, 其数量化依次取作: 0.997, 0.831, 0.665, 0.499, 0.333, 0.166。开发的难度转为开发易度(难度 + 易度 = 1)。这样可得出分数表(略)。

利用专家评估数据, 可以构成各个对策的实际效果矩阵 $\mu^{(k)}$, 即有

$$\begin{aligned} \mu^{(k)} &= [\mu_{ij}^{(k)}] \quad k=1, 2, 3, 4; \\ i &= 1, 2, \dots, 5; \\ j &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned}$$

对于生态效益、环境质量、开发潜力、开发易度来说, 均选用上限效果测度, 因此关于各个局势的效果测度 $\nu_{ij}^{(k)}$ 用下式计算:

$$\nu_{ij}^{(k)} = \frac{\mu_{ij}^{(k)}}{\mu_{\max}^{(k)}} \quad (7-30)$$

经计算, 即可求出各指标的效果, 再利用公式

$$\nu_{ij}^{(\Sigma)} = \frac{\sum_{k=1}^4 \nu_{ij}^{(k)}}{4}$$

即可求出多目标决策的综合矩阵

$$M^{(\Sigma)} = \begin{bmatrix} \frac{0.501}{S_{11}} & \frac{0.501}{S_{12}} & \frac{0.95}{S_{13}} & \frac{0.6255}{S_{14}} & \frac{0.584}{S_{15}} & \frac{0.208}{S_{16}} \\ \frac{0.709}{S_{21}} & \frac{0.709}{S_{22}} & \frac{0.376}{S_{23}} & \frac{0.584}{S_{24}} & \frac{0.626}{S_{25}} & \frac{0.792}{S_{26}} \\ \frac{0.667}{S_{31}} & \frac{0.625}{S_{32}} & \frac{0.501}{S_{33}} & \frac{0.875}{S_{34}} & \frac{0.792}{S_{35}} & \frac{0.667}{S_{36}} \\ \frac{1}{S_{41}} & \frac{0.667}{S_{42}} & \frac{0.418}{S_{43}} & \frac{0.792}{S_{44}} & \frac{0.750}{S_{45}} & \frac{0.709}{S_{46}} \\ \frac{0.418}{S_{51}} & \frac{0.917}{S_{52}} & \frac{0.833}{S_{53}} & \frac{0.875}{S_{54}} & \frac{0.792}{S_{55}} & \frac{0.418}{S_{56}} \end{bmatrix}$$

对决策矩阵 $M^{(\Sigma)}$, 按照行、列, 分别选择最优局势, 如在矩阵的第一行的 6 个元素中, 横线上的 6 个数字以 0.950 为最大, 所以该行的最优局势为 0.950 横线下的 S_{13} , 余类推。于是有

行最优局势含: $S_{13}, S_{26}, S_{34}, S_{41}, S_{52}$

列最优局势含: $S_{41}, S_{52}, S_{13}, S_{34}, S_{54},$

S_{35}, S_{55}, S_{26}

这样, 最优局势为: $S_{13}, S_{26}, S_{34}, S_{35}, S_{41}, S_{52}, S_{55}$

分析上述结果, 则见其有过于专业化的倾向, 为了让专业化生产与多样化生产有机地结合起来, 以发挥水文生态动力源在湖泊条件下的多功能生态经济效应之潜势, 有必要作广义的最优局势决策, 即按行、列选择最优局势和次优局势。于是:

行优序局势: $S_{13}, S_{14}, S_{26}, S_{21}, S_{22}, S_{34}, S_{35},$

$S_{41}, S_{44}, S_{52}, S_{54}$

列优序局势: $S_{41}, S_{21}, S_{52}, S_{22}, S_{13}, S_{53}, S_{34},$

$S_{54}, S_{35}, S_{55}, S_{26}, S_{46}$

得优序局势为: $S_{13}, S_{14}, S_{21}, S_{22}, S_{26}, S_{34}, S_{35},$

$S_{41}, S_{44}, S_{46}, S_{52}, S_{53}, S_{54}, S_{55}$

根据以上分析, 研究对长寿湖水域的水体开发, 从生态经济控制方面, 提出有依据的建议:

I 区(上游河道区): 选择 S_{13} (保护产卵场所, 培育鱼苗), S_{14} (发展库湾养鱼);

II 区(大河缓流区): 选择 S_{21} (捕捞凶猛鱼类, 捕捞产卵后的成鱼), S_{22} (放养大规格鱼苗, 以利用多种类的水生饲料生物和大量的外源性漂浮植物的生长发育), S_{26} (发展旅游, 以高峰为基地建设有特别自然景观优势的旅游场所);

III(湖心区): 选择 S_{34} (发展库湾养鱼和网箱养鱼), S_{35} (开展水生物种植, 以利于鱼类繁育和水面消浪, 改善水体流动状况);

IV 区(大坝汇积区): 选择 S_{41} (发挥水面开阔之优势, 捕捞成鱼, 建设捕捞基地), S_{44} (发展网箱养鱼), S_{46} (发展旅游产业, 开展水上运动);

V 区(小河滞水区): 选择 S_{52} (利用水质肥沃这一优势, 放养鱼苗), S_{53} (拴养亲鱼、培育鱼种), S_{55} (根据水色深、透明度差的事实, 开展水种植以改善水质, 并为产过卵的亲鱼索饵繁育提供有利条件)。

三、几点认识

灰色系统中局势决策,用于生态经济决策,是一种比较有效的方法。上述只是一个例子,但它的应用则是多方面的,在灰色系统创建初期,有人已用于大型水利工程人民胜利渠的局势决策,收到好的效果。只就与水域有关的水库、湖泊、灌渠来说,作者曾去过大小多个,如都江堰、泾惠灌渠、大伙房水库、清河水库、茆窝水库、乌金塘水库、卧龙湖等多处,在那些地方,近年都考虑有关生态经济的多种经营问题,这是近 20 多年,我国公众生态意识增强的表现。如能很好用生态控制原理定量分析计算,效果当会更好。但是,调查中发现,有些水利工作者对于生态控制不太理解,仍认为水库主要是用于防洪兴利,只围绕水这个字转,而其实水文生态动力源正是将水与许多生物结合起来考虑问题的,否则单纯为了兴利,破坏了水域生态平衡,后果不堪设想,以致抵毁了兴利意义。

在上述例子中,也可看出,方法还能用到许多其他方面。但问题的关键是专家意见,要有代表性,否则,算得再准,也无济于事。但是,靠召开专家咨询会总是不大容易,偶尔开一两次会,也要多方面准备。为此,近年研制出的群决策支持系统,可以发挥其他方式不易代替的作用。

第五节 混沌生态控制

混沌生态控制是非清晰生态控制的一个重要组成部分,并且是比模糊控制、灰色控制更高一级的非清晰控制手段。所谓混沌生态控制就是把某些(某一)生态动力系统的原有的不很合乎人的要求的混沌态转化为比较合乎人的要求(从人的愿望来说,应使其尽量达到最优,最为合乎人的要求;但客观上十分困难,要求过高,反难成功,故往往只能相对最优,比较合乎人的要求)的事先确定的平衡状态,周期状态或在耗散旧质,引进新质的新的混沌状态,并实行稳定控制。这里所说的生态动力系统可以用微分方程描述的连续系统,也可以是由映射描述的离散系统。

如《生态动力学》一书第九章所论述的,在生态系统中,混沌现象是广泛存在的,但在那里阐述的基本上是生态动力方面的混沌规律的一般特征,旨在认识生态混沌,但基本未语于如何驾驭混沌规律的问题。从生态动力角度出发,来认识这一问题,则主要是经由人工生态动力源的作用,使生态混沌系统向着有利的方向转化,达到新的混沌平衡态。

下面让我们简述几种主要方案,再述有关应用。

一、OGY 方案及生态应用

该方案系由 E.Ott, C.Grebogi 和 J.Yorke 共同提出(见 E.Ott, 1993),以三人各自姓氏的第一个字母按顺序组合而成。该方案基于“系统动力学行为对初值敏感性”这一混沌的基本性质,在生态动力系统的控制问题中,如果对源和(或)汇控制不得当,会造成生态动力的严重负效应;反之,控制得当,即在适当条件下,以人工生态动力源的尽量少的努力,取得尽量好的效果,实现生态混沌的最优化,必将使正效率增强,有益于生态效益增强。该方案的另一基础是混沌吸引子的几何结构。生态混沌吸引域是一些不稳定周期轨道的无穷集合,若选用其中任一轨道为控制目标,等待若干时间后,系统的动力学行为将接近所预期的周期轨道,调整系统的某个可控参数,由于混沌对初值的敏感性,则使

系统对于所施加的任意小的扰动,都会作出迅速的响应,使系统达到并保持在这个目标周期轨道上。这样,以这个 OGY 方案为理论依据,就可以用具有任意小的参数摄动特点的人工生态动力源措施,使构成混沌吸引子的任一不稳定周期轨道变得稳定,从而实现生态混沌系统的优化控制。

OGY 方案实际上只适用于离散系统及可以把连续系统转化为离散系统的情形。该方案的一个显著优点是:它无需知道生态混沌系统控制的整体行为,系统的动力学映像可以直接地从通过实验测定的数据构造出来。经过改进和完善的 OGY 方案,也可用于高周期及高维系统的生态混沌控制。由于生态系统多是离散系统,所以该方案广泛适用于生态问题。

然而,OGY 方案要求系统的参数变化不能超过一定的允许范围,否则在经过微扰之后,系统的局部动态行为会发生畸变,所以该方案原来只能控制生态混沌系统中周期较低的轨道。在 20 世纪 90 年代,有人提出偶然正反馈(OPF)技术,利用该技术的优点是:只需小信号微扰便可控制生态混沌系统中较低的周期轨道;而且,通过调整限制微扰的窗口宽度及反馈信号的增益,可以控制较高的周期轨道。普适性和高效率是该种技术的突出优点。

但是,上述两种方法的共同特点是:它们均只限于离散系统的混沌控制,因此,在实际应用中受到限制,只能稳定满足要求的某些特定的周期轨道,而且,由于系统受涨落和环境噪声的影响,不可避免地会导致系统中偶然出现突变行为,使得所期望的周期信号消失。

为了克服上述缺点,有人提出外力-反馈控制法。这是一种混沌的连续控制法,其基本思想是考虑混沌系统中的周期信号的连续控制;外力-反馈控制法与 OGY 法的显著区别是:在 OGY 法中,只能在系统状态接近所需的周期态(或称不动点)时,才能对参数进行微扰。这是因为 OGY 法的要害是,在不动点附近的偏差采用了线性近似处理,外力控制法则完全不受此限制。这种方法的关键技术是,必须设计一个特殊的外部周期信号发生器,以产生所需的各种正比信号,原则上要能产生无穷多的周期信号,因为混沌中包含无穷多的周期轨道,从中提取所有的周期信号,就不那么容易了。所以,此方法所要求的技术很高,即给运行带来技术上的困难。为了克服外力-反馈控制法中的技术困难,有人提出延迟反馈控制法,这种方法,是从系统本身输出的信号中,取出一部分,经过延迟处理,再反馈到系统中去,以代替外部输出,这样做,在技术上比较容易实现。

长期以来,人们对生态混沌系统的行为,无法施加人工生态动力源方面的主动控制以达到人们所预期的目标,即作为人工生态动力源主体的行为控制者,基本上总是处于被动状态的。然而,一些混沌理论研究者提出的一些代表混沌控制最新进展的方法,为生态混沌控制提供了有力武器。Pecora 和 Carroll 提出了混沌同步法。Kyragas 提出对混沌奇异吸引子中非周期轨道的一种稳定控制方法。这种方法,使一些不可预测的混沌变成可以跟踪控制的混沌。上述几个研究者提出的新方法,使混沌控制旧貌换新颜、变被动为主动。

下面让我们简要地了解一下 Kyragas 的方法。该方法即非周期轨道控制法。其基本思想是把反馈控制法与下述的混沌控制的同步原理结合起来,从而达到控制非周期轨道的目的。图 7-2 给出该方法的物理原理示意图。从图中可以看出;该法要求其过程包

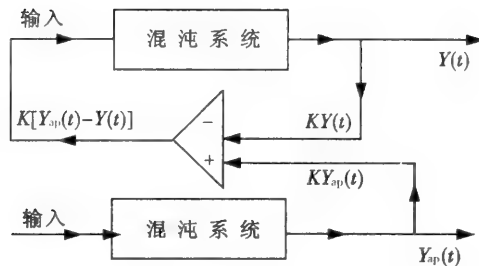


图 7-2 控制混沌中非周期轨道原理示意图

括两个阶段。在第一阶段,先把未扰动系统的输出的非周期信号 $Y_{ap}(t)$ 的所需部分划分出来并记录在记忆原件中,即把欲跟踪控制的混沌中的非周期轨道真实地记录下来;在第二阶段,利用小反馈扰动 $F(t) = K[Y_{ap}(t) - Y(t)]$,迫使系统准确地重复所记录的过去的信号。该扰动的重要特点是:当输出信号与所记录的过去信号相吻合时,即当 $Y(t) = Y_{ap}(t)$ 时, $F(t) \rightarrow 0$ 。因此,该法并不改变所记录的非周期信号 Y_{ap} ,这种扰动起到了自控制的作用。因为它总是趋向把当时的信号 $Y(t)$ 吸引到所期望的非周期轨道 $Y_{ap}(t)$ 上去,在适当调节权重系数 K 的条件下,可以实现对 $Y_{ap}(t)$ 的稳定控制。当达到稳定化的时候, $Y(t) = Y_{ap}(t)$,于是,微扰变得非常小。此法表明:只要利用一种特殊形式的外部的小扰动,就可以使混沌系统中当时的非周期行为与记录于记忆中的它的过去非周期信号达到同步,在任何时刻都可以对系统的混沌行为实行跟踪控制。

在前面所讨论的控制混沌方法中,其共同特点是:利用与时间有关的连续小微扰来实现对混沌的稳定控制。当微扰趋于零或无限小时,则达到所需周期或非周期信号的稳定化。在 OGY 法中,由于在不动点附近微扰,故将所需信号稳定地控制住了。在外力或延迟自反馈控制中,引入微扰后,系统维数增加,以增加原系统维数来获得稳定性所需的必要条件,即表征混沌特性的 Ляпунов 指数从正变为负,从不稳定变为稳定,这就是其物理实质之所在。

二、心脏混沌与施加生态动力的控制试验

各种动物和人的心脏都是其身体的重要器官,其健康与否与整个身体健康关系极大,也可以说,同人的生命关系密切。心脏猝死发生时,心脏会出现致命性的心律失常,而在猝死发生前,并无先兆,是人们事先预料不到的一种突变,其后果之严重,则是夺去生命。在某些情况下,这种心搏属于心动过缓(慢心率),但在大多数情形下,是心动过速(快心率),而且通常起于心室。虽然心动过速开始时相当规则,但随后在心电图上一般退化为低幅,不规则的被动形式,反映出心脏内部出现了“纤维性颤动”。这种颤动对生命威胁很大。混沌生物学的研究已表明:心脏纤维性颤动是一种混沌。

经过多年不断研究,人们已经认识到:通过人工生态动力源作用,可以导致纤维性颤动。这类试验可找到一些现象的混沌规律,为创建新的治疗措施,提供科学依据。对于心脏的加电刺激,有人拿兔子心脏作为标本进行过实验,经左冠动脉室间隔,注以动脉灌注液,通过埋藏在标本中的白金电极,在计算机控制下,以持久电压脉冲刺激心脏。试验结果显示电刺激可以引起纤维性颤动。

实验也证实:可以用实验的方法诱导心律失常。仍用兔子心脏作为标本,在动脉灌

注液中加 G 毒毛旋花苷和肾上腺素,它们起动心脏活动,但不起动心脏自动活动,以此来诱导心律失常。自动活动的引发是由 Na^+ 泵的抑制, Ca^{2+} 流量的增加,从而导致细胞内 Ca^{2+} 超负荷。在标本的 85% 发展成为一个高度不规则的非周期性自发跳动方式之前, G 毒毛旋花苷和肾上腺素诱导自发跳动,起初具有恒定的心跳间隔,以后的发展显示出混沌特性。

在前述 OGY 法被一些学者确认之后,有人研制“混沌起搏器”以调节兔子心搏的不规则性。普通的起搏器只是简单地使心脏以预先确定的心率跳动。“混沌起搏器”则不同,它的发放并不规则,但足以使心脏系统维持其自然的周期节律。这就是说,控制心脏混沌的方法可以由一个灵巧的起搏器来完成,这种起搏器能够完成“恢复心脏节律,使其达到正常”这一“任务”。

心脏本身并不会自行停止其纤维性颤动。这种混沌是稳定的。以往的治疗方法是“除纤颤器”电击,以使心脏恢复到定态,对此,理论生物学家 Winfree 提出,这种电击的长短和形状的确定,完全凭经验,而无理论依据。而后来研制的混沌起搏器,则是以 OGY 理论为指导的,它不是强电击,其基础的实质是“牵一发而动全身”的混沌系统对初始条件的极端敏感依赖性。

三、混沌相对稳态与生态产量的最优混沌控制策略

某种粮食作物有多个优良品种,比如为 S_1, S_2, \dots, S_n , 在这些优良品种中, S_1 在初推广的第一年和第二年中,总产量和生态产量都很高,所以该品种倍受 I 区和 II 区栽培者的“青睐”,尤其 I 区向来被誉为“粮仓”,在第一年和第二年表现更好。但由于当地人只顾全面追求总的高产,而未从生态动力角度,分析控制生态产量的主要生态动力因子,所以凭感性认识推断,在第三年仍按前两年的种植方案安排生产并予实施,结果, I 区的生态产量照第一年和第二年有明显下降,而 II 区的生态产量和第一年与第二年基本一样。对于这种情况,生态工作者,从生态因子混沌态和振动幅度方面加以分析。用概率统计分析方法对影响该品种产量原因逐一排查。从产量形成的三个大的组成部分(详见《生态动力学》一书第十章),先行排查:第一,关于基因产量,从制种情况和所用种子的种质,各年并不变化,可视为相对稳定,即第一、第二和第三年所用种子对总产量的作用是基本一样的;第二,从随机振荡产量来说,这三个所采取的田间管理措施,如施肥、防治病虫害、除草等是稳定的,没有混沌态涨落存在;第三,从生态产量来说,我们可以依次考虑各类生态动力因子的稳定态和混沌态。从地貌因子来说,该地区 3 a 内,均为进行小流域治理和农田基本建设活动,其地貌可以说是完全没有变化的,因此首先排除地貌类因子的生态混沌对生态产量的控制作用;从土壤因子来说,3 a 内也是没有太大变化的,因为未进行土壤改良,土壤的许多物理性质并无改变,只是施肥造成化学性质的少量变动,但经过化学方法的分析检测,其变化对产量的影响甚微;从水文类生态动力因子来说,这 3 年并无洪水发生,而且该种作物是不灌溉的,故农业水文生态动力源可视为非混沌态;从气象类生态动力因子来说,在该种作物生育盛期,第一、第二两年 7~8 月份降水量 I 区和 II 区大概相同,但第三年同时期内, I 区的降水量是 II 区的 2 倍,这可以说,生育盛期降水量的多寡是气象类生态动力因子混沌态的表现,该期降水量涨落振动幅度大,处于混沌态,才使生态产量并导致总产量在 I 区和 II 区,大相径庭。以上的分析,有些可以从机理上清晰看出,其影响该排除即行排除,无需用数学方法加以检验,比如洪水问题,未

发生就是未发生,当然不可能冲走Ⅰ区和Ⅱ区的庄稼。但有些,则需要利用已有的有限数据,进行检验,比如用《自然灾害非参数统计方法》一书中第279~288页的方法并参照实例,加以检验,以便使排查结论更趋于客观化。知道了混沌的初步结果,即可以对所获得的显示结果,从机理上加以分析,原来在该种作物生育盛期内,如果遇到7~8月份的降水量较大,则易发生对生产产量乃至总产量有至关重要影响的一种病害。而在第一、第二两年,Ⅰ区降水量与Ⅱ区相当,所以盛夏雨量对产量的影响不显著。但7~8月降水量振幅大,显示混沌态是必然规律。从长远考虑,我们查阅Ⅰ区和Ⅱ区各近50年的对应大样本的7~8月降水量,结果发现,Ⅰ区雨比Ⅱ区多的年份占90%,相当或略少于Ⅱ区的只占10%,这就从气候生态上,说明Ⅰ区常年降水量超过Ⅱ区,所以该品种种在Ⅱ区是有90%的把握高产,而种在Ⅰ区有90%把握是减产,故从气候生态规律分析,Ⅰ区最好改用其他良种(抗同类病害能力强的品种)。至于第一、第二年Ⅰ区用所论品种未减产,那只是特殊情况,即概率为十分之一的情况。有读者大概想到天气生态动力问题,即按7~8月份降水量的混沌态,靠年度的天气预报安排品种,即如果在播种之前就预报出当年在Ⅰ区7~8月份降水量少,那么就依此安排品种,岂不更好。其实,这是不对的,究其本质是忽略了天气生态动力混沌态与气候生态动力混沌态的差别。后者的混沌涨落幅度比前者小得多。因为现在气象学发展的水平,远远没达到提前一年作出准确降水趋势预报的水平,所以一般不考虑天气混沌态来安排品种。在某种情形下,即使有必要考虑亦须参照《生态动力学》一书第233~235页的决策手段,对生态混沌加以控制。

从长远的观点看问题,什么是生态混沌控制的最优控制手段(即使混沌态走向有序态)呢?那就是基于气候生态动力源难于预测(即年度)的“长期预报,尚待探索”(丑纪范语)这一事实,暂不调节生态动力源中的7~8月降水量(事实上,在现阶段,虽然自上个世纪40年代中期以来,Langmur和Sheafer等的试验已说明人类能够影响天气尤其是降雨,宣告了weather modification的可实现性,但50多年后的今天,weather modification的影响作用甚微,以致不可能左右7~8月这两个多雨月份的降水总量,而气候的人工影响climate modification,除局部或小气候还是不可能的)这个水文气象性质的生态动力源,而是调节生态动力汇——玉米品种——的落区。也就是说,对于Ⅰ区,由于盛夏多而易染病害,我们可以把易染病害品种放入Ⅱ区种植,而在Ⅰ区改用抗病性强的品种。这样一来,品种落区,各得其所,于是,从生态控制的宏观调节上,达到了优化控制的目的。对于一个大范围,作这样的选种、引种暨落区调整,是调节生态动力汇的适应,同时,也是调节即优化控制种子生态动力源,达到全局增产的终极目标。这也是生态混沌走向有序的一种系统集成技术。当可向多种作物、多种品种和多样的土壤、气候、地貌等生态因子方面加以推广。

这样做的结果,当可比药物防治等治标技术取得好的成果。在东北的一些地方,我们做过尝试,证实了上述观点。

四、设施环境中作物病害的生态混沌控制策略

设施农业环境中作物的病害会减少受害作物的生态产量。但这种减产量值的大小是混沌态的,人对其认识也是混沌的。这就给病害的生态控制带来许多不清晰性。而利用混沌控制的基本原则,提高对植物病害减产、病害科学防御问题的认识水平,可以在实践中,提高病害控制的能力。然而,在过去相当长的时间内,人们对真菌病害防治的认

识,停留在治标措施的混沌态认识之中。例如,早在1974年,James(见 *Ann. Rev. Phytopathol.* 12, 27~48)提出的方法,是把病害与减产的定量关系编绘成一目了然的图。利用这样的图,力图在获得一定产量数据的基础上,使每一次杀真菌药物的喷洒合理化。这种以药物防御的有效措施,就其实质仍是一种治标措施,但至少直到20世纪80年代初仍视为防治真菌病害的最重要措施。而对治本措施,比较早引起重视的是品种の利用,即选用抗病能力强的品种,这乃是一种基因调节措施。尽管人们对于导致真菌性病害的原因及主要防治策略的生态控制问题,早有认识,但可以说直到10多年前,这种认识本身尚被束缚于混沌认识状态的误区。以致未能很好耗散掉这种误区的旧质。我国于20世纪80年代,尤其是该年代中后期迅速崛起的霜期农业,促进了生态控制从混沌走向有序的发展,以致对生态控制霜霉病等真菌病害的生态防治的认识,从以往的混沌走向比较稳定的有序并形成新条件下的新的认识,对生态混沌防治提出新的要求。这种新形态下的混沌,不再是采用生态治本防治手段的重要性问题,而是在充分认识重要性的前提下,采取什么方式的问题。首先,从经验和初步定量试验认识到一些措施,比如说,环境设施的通风技术,环境湿度的控制技术。但这些技术的实施,涉及优化控制的数学方法问题,而在上世纪80年代末以来,相应的方法和软件可供应用,于是统计决策,运筹学中的各种决策论方法和对策论,模拟方法,在这种对混沌充分并相对正确认识的基础上,经由中试直到全面推广。这样处理的生态混沌问题,主要有三类:一是改明渠(沟)灌溉为暗(管)灌溉,以减少水分向大棚内的输入,使相对湿度和绝对湿度减小,这是对微观水文生态动力源从混沌化向清晰的认知并付诸实施。二是对所用大棚膜进行对比观测,看当地以有滴膜和无滴膜以及不同厂家生产的无滴膜,减少湿度的效果;正如所预期的那样,在从防霜霉病降低湿度的目的来说,有滴膜是不该用的,而无滴膜,以用辽东某厂生产的为好,如该厂产品脱销,则用辽西某厂生产的无滴膜,这是从湿度混沌控制的角度,从混沌转折到清晰的生态控制,主要以实际试验数据作为转折的依据。三是对霜霉病防治,从生态方面入手,主要是对温室通风进行科学调节,在一般情况下,通风合理,是断绝霜霉病真菌孢子赖以生存的气象生态动力源的有力措施,但是通风过量却又影响气象生态动力源——温度,进而影响作物生长。因此,一方面要通风,另一方面要保持大棚内温度,还要考虑真菌病害的药物防治措施,因为在通风防御未果时,就要用化学防治手段以控制病害。这几个问题交织在一起,构成从认识到实现,从自然因素到人为行为的混沌态。怎样处理呢?这就须用运筹优化方法进行计算,或者用仿真优化,经过如用Markov Decision Programming等方法,依据有限阶段模型事先作出的表格,就可以从混沌走向清晰。这个过程是动用数学工具的实践,尽量利用生态防治,只在必要时用化学防治,是处理生态混沌控制的一种优化手段,在许多类似问题中,均可应用。

五、孵化环境混沌态的生态控制

鸡的孵化由来已久,从民间的孵化到现代孵化已是从混沌走向清晰的一步。这里不予论述,读者亦可自明,而在现代孵化技术中,最佳孵化的生态环境的优化控制系统一步步地发展完善,乃是从混沌的原始态发展起来的,从混沌走向清晰的必然的“否定之否定”规律。这样做是为高效率集约型自动化孵化技术,提供了理论和技术基础。而从混沌态逐步走向清晰的发展,原则上是以优化调节生态动力源为目标的。但是,这种调节不是单从某一个学科和某一项技术出发的局部调节,而是一种依赖于多学科交叉的控制

技术。在近 10 年内,孵化环境的生态控制技术吸收并应用了现代数学、物理学、生物学、计算机科学等学科的许多研究成果。

1. 对孵化气候生态动力源的认识

据畜牧生态动力学的研究,温度、湿度和风是鸡孵化环境气候生态动力源的三个主要因子。这个认识,可以说是清晰的。

(1) 温度指标及混沌控制

鸡胚发育中的各种代谢活动都是在一定温度条件下进行的。在这个发育过程中,不仅应保持一定的温度范围,而且要保持温度的相对稳定,因为鸡胚只能承受短时间的温度变化不大的混沌状态,对冷热应激(stress)都有不良反应。温度的混沌态在孵化的不同时期以及这种混沌维持时间的长短,对孵化率和健雏率都有不同程度的影响。现场实验观察和结果分析表明,温度相对稳定是重要的,并给出许多指标,但只有这些指标,还谈不到对混沌态的优化控制,而在取得数据和理论分析的启发下,用现代控制理论、决策、对策、模拟等运筹方法,对温度混沌态作控制,才是混沌控制的可靠手段。本书第四章、第八章所述的定量方法均可试用。

(2) 温度指标及混沌控制

鸡胚的适度范围,是畜牧学上基本掌握的。但湿度指标的相对混沌态是控制的基础。事实上,适宜温度范围是一个相对混沌的概念。它因种鸡年龄,蛋壳传导性和蛋的重量而异。一般来说,孵化小龄种鸡的蛋所需温度低;蛋壳的传导性影响鸡胚的水分收支。确定孵化温度的最佳方法是:在孵化期间,跟踪监测蛋重,湿度维持在使蛋的日失重为 0.60%~0.65% 时为佳。这是一个混沌的相对指标,为达到在不同条件下,找出相对稳定态指标之目的,可用均匀设计(uniform design)进行必要的试验。总之,在确定孵化温度时,将温度视为生态动力源,将蛋的重量、蛋壳质量以及种鸡、鸡龄等视为生态动力汇,运用如前段所述的各种优化生态控制技术,作最优化计算,以控制温度这个“源”为目标,针对具体的“汇”,给出使混沌走向相对稳定的方法,并具体实施之。一般情形下,针对混沌态的各种错综变化,优化控制温度,有益于孵化率和健雏率的提高。

(3) 优化通风:从混沌到有序优化控制

通风是用生态方法实施孵化器与外界环境实施空气交换的得力措施,是充分利用孵化器之外的生态动力源调节生态小生境以促进胚胎发育的不可或缺的手段。通风不仅会使孵化器中的原处于相当程度的混沌状态的热量和水分进行优化循环,从混沌走向有序——达到呈均匀分布的目标,而且从具有物质意义的生态动力源来说,通风的作用是:能够带走环境中过量的有害气体,如 CO_2 ,而同时自外界输入新鲜的氧气。在孵化的全过程中,每只鸡胚约需耗氧 8100 cm^3 ,排出 CO_2 约 4100 cm^3 。鸡胚的气体交换随着胚龄的增大而逐渐增多,鸡胚在其发育过程中,从第 1 天到第 2 天,氧气吸收量和 CO_2 排出量,增加 100 倍。实践证明,当孵化环境中氧气浓度为 21% 时,孵化率最高,由此每下降 1% 孵化率降 5%,所以,在孵化过程中,根据孵化时期优化控制通风量,才能满足鸡胚发育需要。而且,通风是与环境的温度、湿度这些上述本来有混沌性质的作为鸡胚生态动力源因子的要素密切相关,这就必须使整个微观生态系统处于更加混沌状态,而要使其达到指标所要求的相对有序,则不能用一般的线性系统的微分方程加以处理。比较适宜的生态混沌控制手段是利用马氏决策的有限阶段模型。该种模型在温室,通风的霜霉病控制中应用取得好效果。在孵化通风问题中,可借鉴应用。但是,由于其中复杂的混沌

态,故在应用中需多积累微观数据。应用成功与否的关键是确定转移概率。

(4)宏观环境混沌特征的考虑

众所周知,传统孵化法受混沌态的外界生态动力源因子的影响很大,而现代的一些机电孵化法也不是与外因环境隔绝的,比如前段所述的通风,就是控制外界环境影响的一种措施。所以在通风调控过程中,须充分考虑气候、季节和地理位置方面的生态动力源的变化和混沌特征,以便针对不同的宏观环境采用不同的控制手段。

我国幅员辽阔,地势差异大,地貌复杂多样,气候差异显著。这就造成了生态动力源的混沌性,以及对孵化影响的混沌特征。为使混沌走向有序,基本策略是充分认识源之影响的基本变化规律,从而给出宏观控制的原则性策略。首先,考虑湿度,从地域来说,海滨比内陆大,湖畔比远离湖泊的地方大;从季节来说,在同一地理条件下,春天梅雨季节的湿度比冬季干燥季节大。上述规律无论从观测记录,还是从科学原理,都能够看得出来,这是一种有序的认识。我国南方夏季高湿、高温,只有经常通风换气,才可加快孵化器内空气流动,使内部不适应孵化的混沌态的空气变为相对有序,从而使蛋内水分蒸发正常化,有利于散热。其次,考虑地势,地势高低对孵化的影响主要体现在供氧方面,在海拔高度超过 1200 m 的地方,氧气对胚胎的成活就显得更为重要,所以,在高原上,可以通过加氧或进行空气压缩的方法,模拟 1200 m 海拔高度的氧气含量来解决缺氧问题。在我国青海、新疆、西藏、内蒙以及其他海拔高的地方,应重点考虑氧气供给问题。

2. 人工调节生态动力与自动控制技术的生态混沌问题

(1)新孵化法与生态因子特征试验

对处于混沌态的孵化环境采用人为调节措施,使孵化与环境关系达到相对有序,是生态措施适应遗传工程需要的一种技术进步。体外孵蛋技术的成功实施,为更好地研究胚胎生长对环境的要求以便优化生态工程的研究开辟了新的途径。另外,有人做过蛋壳剥离与不剥离的对照试验,由此来寻找孵化环境温度的混沌特征与蛋壳结构,成分之间的关系。

(2)物化方法刺激胚胎

近 10 年来,以激光、射线和电离空气流作为具有刺激性的物理性质的生态动力源,以提高孵化率。如氦、氖,激光促孵扫描机的应用,使孵化率提高 10% 以上,用特制激光装置对入孵前种蛋进行照射,使鸡胚发育加快,死亡率下降,出雏率、育成率均有所提高;电离空气流也会影响胚胎发育中的某些代谢因素,从而使孵化率提高。

(3)孵化环境控制系统

孵化设备是改善和利用孵化对象生态小生境的必要设施。我国和古埃及是最早发明人工孵化设施及其利用的国家,经历过缸孵、炕孵、煤油灯孵等简单落后的阶段。但其本质仍是为孵化创造相对优化的环境,使原本处于混沌态的环境,通过人工调节,变得相对有序。到现代,已发展到机电孵化乃至全自动孵化的阶段,向着大型化,配套化的方向发展。

20 世纪 70 年代以来,微电脑在农业生物环境工程控制领域中得到越来越广泛的应用,这自然也使工程控制论在其中大显身手。现在,微电脑孵化控制技术,正从计算机的数字直接控制(direct digital control)向监督控制(superisory control)发展。而监督控制的效果在很大程度上取决于孵化环境模型的优度,而新的控制理论的发展,会使人们在混沌中找出有序,在模糊中找到光明。现已成型的模糊控制理论,是控制论中的新的成果,

也是应用数学领域里的一项有用的成果,它摆脱了原有的精确数学模型的约束,适宜于复杂多变的混沌态的孵化器中存在的变化过程,为孵化生态环境的自动控制开辟了新路。近年依此研制的采用模糊控制原理的自动控温孵化器,其控制精度和稳定性都是很好的。

(4)存在问题及未来发展方向

孵化生态环境的创建和优化控制的发展,是提高生产力的重要环节。这种环境,人们对它的认识,还有许多混沌态的问题存在。走向有序的第一步是求出适宜指标,这需要生态、气象、数学、电子、材料多学科为畜牧养殖专业作贡献。我国传统孵化法向现代孵化法,正在过渡。在此阶段,用生态控制原理和技术,为现代化合理的孵化努力,是生态控制研究者的任务之一。

六、山地空气冷径流、逆温的混沌特征及应用

在山区,冷暖空气的运动规律是复杂的。如不进行专门的研究,人们对其中规律的认识总是限于混沌态。由于认识上的混沌,尤其是在未能发现混沌中的有序特征时,就往往只注意到其中不利的一面,而对有利的一面未能加以优化管理。在日本,多年来,对山区冷径流及逆温规律的认识,尤其是利用先进仪器观测并用数学物理方法分析,综合而揭示出来的比较有序的认识,使人们能够自觉地加以控制,使原本处于混沌态的某些认识得以明确,从中发现有益的生态动力源依其发展生产,提高栽培作物的生态产量和质量。如多年的研究,认识到:冷径流的源地、径流域和滞留域,径流的间断性和周期性,径流的厚度,风向、风速、冷气湖的成因及垂直结构;坡地逆温的成因、厚度和强度。上述的规律,一般均属地学方面的生态动力源自身的规律。结合生态动力汇的认识,才是研究上述规律的生态控制目的。在日本,由于生态工作者的努力,取得了在农业生产上应用方面的成果,其中主要有以下几个方面:①利用坡地温暖带,扩大了茶树、柑橘的栽培面积。日本茶树栽培的北界已达到关东北部至新湾果一线(约 $38^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$)。静岗县的名茶产地——安倍川、大井川和天童川的中上游地区——差不多都只分布在坡地温暖带内。日本柑橘栽培的北界,已达到茨城县的真壁町、兵东县的春日町(约 36°N)。而在日本全国,有90%的柑橘分布在丘陵、山区。②运用冷径流的分布特征,改良园地的立地条件,防止径流的积滞,这是控制低温灾害的一项治本措施。③利用逆温和冷径流规律,制订可控制某些自然灾害的优化栽培措施。比如,控制茶树采摘面的高度以减轻冻害。据研究,采摘面较高的茶树,冻害较轻,反之亦然。所以,为减轻冻害茶树修剪高度的优化确定,宜视坡地逆温强度和冷径流厚度而定。

七、农药残留的混沌特征及控制

在生态农业产品中,无污染的“绿色”农产品倍受消费者“青睐”。但是,在现代农业生产中,作为化学生态动力源的农药用得较多,造成的残留污染严重。但由于生产者往往追求高产的经济效果而对残留物认识又是混沌态的,所以不能有序地控制。其实,农药作为一种化学生态动力源,喷洒到作物身上或进入作为地学生态动力源的土壤之中,经过一段时间,由于各级生态动力源的作用——比如,由于光照,自然降解,雨淋高温挥发,微生物分解,植物代谢作用——使绝大部分消失,但仍有微量的农药残留物。这些残留物不作用于病、虫和杂草,但构成危害人、畜和某些有益生物的生态动力源,即它们无

生态正效应却有生态负效应。随着对它们的认识,从机理上的混沌到相对有序,人们已掌握了控制农药残留的许多技术并积累了丰富的经验,今后在利用本书第四章以及其他有关章节的生态控制原理,当可实现优化控制的目标,这对生态农业,对绿色食品的发展,无疑是一个福音。在这一段,不必要也不可能把控制论应用于该问题的一系列方法加以详述,只是简述一下基本办法,有了这些,再取得一定实验资料,即可得出生态控制的优化策略。至此,也可以说从混沌走向相对有序。下述主要手段:①对症用药,主要是确定关键期与合理方法;②正确掌握浓度,用药量;③改进农药性能;④合理混用农药。应尤其重视预防为主,综合防治的方针。高毒、高残留农药,不得用于果树、蔬菜、中草药、烟草等作物,禁止利用农药杀鱼、虾、青蛙和有益的鸟兽。采取避毒措施:在受农药污染较严重地区,在一定时期内,不栽种易吸收农药的作物,而栽培抗病、抗虫的新品种作物,以减少农药的施用量。在综合防治方面,积极开展农化防治和生物防治,实行农作物的合理轮作和倒茬;积极发展高效、低毒、低残留的农药品种,严禁使用被淘汰的农药品种。在收获期控制上,不允许在安全间隔期内收获和利用栽培作物。去污染处理是必要的,对残留在作物、果蔬表面的农药,可施行去污处理,如通过曝晒、清洗,去农药残留污染。

以上措施,是不同行业多年研究得出的对控制农药残留办法的相对有序认识,相对于过去的混沌认识,是提高了一大步。我们在这里之所以谓之相对有序,是因为在理论和实践上,仍有许多属于混沌的非清晰问题,尚待定量地优化处理,尤其是运用生态数学模型,才能在现有混沌条件下,使系统走向有序的进程加快。

八、物种、资源竞争中的振荡与混沌控制

资源竞争与物种关系的振荡与混沌关系,是物种生态竞争用于生态控制的基础。下面简介其新的模式和模拟结果指出其生态控制意义。

1. 模式

Huisman 等(2002)考虑 k 种资源的几个物种的竞争问题。

设 N_i 是物种 i 的丰度, R_j 是资源 j 的有效性。物种和资源的动态用如下的竞争模式描述(Huisman *et al.*, 1999):

$$\frac{dN_i}{dt} = N_i [\mu_i(R_1, \dots, R_k) - m_i] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7-31-1)$$

$$\frac{dR_j}{dt} = D(S_j - R_j) - \sum_{i=1}^n C_{ji} \mu_i(R_1, \dots, R_k) N_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7-31-2)$$

式中, $\mu_i(R_1, \dots, R_k)$ 是作为资源有效性函数的物种 i 的比生长速率; m_i 是物种 i 特定死亡率; D 是系统的翻转率(turnover rate); S_j 是资源 j 的补给浓度(supply concentration); c_{ji} 是物种 i 中资源 j 的含量。

假定方程(7-31-1)和方程(7-31-2)中的比生长速率服从 Monod 方程与 von Liebig 最小值定律联合的规律:

$$\mu_i(R_1, \dots, R_k) = r_i \text{MIN} \left(\frac{R_1}{K_{ji} + R_1}, \dots, \frac{R_k}{K_{ki} + R_k} \right) \quad (7-32)$$

式中, r_i 是物种 i 的最大比生长速率, K_{ji} 是第 i 个物种第 j 个资源的半饱和常数, MIN 是最低信号接收者(minimum operator)。

假定比生长速率由 k 个 Monod 项的乘积决定

$$\mu_i(R_1, \dots, R_k) = r_i \prod_{j=1}^k \frac{R_j}{K_{ji} + R_j} \quad (7-33)$$

对于给定资源 j 来说,物种 i 的竞争能力用它的资源需求 R_{ji}^* 表示; R_{ji}^* 的定义是:假定除资源 j 以外的其他一切资源都处于充分补给状态下,且物种 i 维持稳定时资源 j 的有效性。按照方程(7-31)和方程(7-33),有

$$R_{ji}^* = \frac{m_i K_{ji}}{r_i - m_i} \quad (7-34)$$

2. 竞争振荡与混沌的模拟结果及其意义

利用前述模式,Huisman 等的模拟结果证实了,对于三种或三种以上完全的必要资源来说,竞争可能使物种丰度产生振荡和混沌振动。结果指出:类似的动态也能在有相互作用的必要资源中找到。因此“资源竞争可能生成非平衡动态”这一观察结果,不以 Liebig 最低值定律为转移。而模拟结果指出,竞争动态依赖于物种资源需求和资源消费特征之间的关系。对于具有相互作用性质的必要资源来说,竞争结果如下:①如果对于物种所消耗的主要资源来说,物种是弱势竞争者,就会生成稳定的共存状态;②如果对于物种所消耗的主要资源来说,物种是中等水平竞争者,就会生成非平衡状态的动态;③如果对于物种所消耗的主要资源来说,物种是强势竞争者,就会生成一种竞争排斥,其优胜者取决于初始条件。

通过理论上的建模和实际模拟,Huisman 等最近(2002)证实多资源条件下多物种之间的竞争可以产生物种丰度的振荡和混沌;这些非平衡动态可以有力地解释生物多样性的原因,利用混沌方面的理论规律对已有多年的生存竞争原理作了修正和改进。这无疑有助于认识生态动力源、汇之间的复杂规律,使人们在考虑混沌规律、处理生态控制的实践更有理论依据,更能主动、客观地采取必要行动。对于自然界野生生物来说,可以通过人工生态动力源调节,保护自然生态环境。对于应用方面,如农、林、牧业,可依其作竞争者(生物物种)生存竞争的控制依据,比如调整农、林、牧作物的结构,调整家畜(禽)种类乃至品种结构,让生态农业更趋于合理化,发展“两高一优”大农业,在人的生存环境和卫生防疫方面,可依此规律调节防疫措施,减轻流行病尤其是人畜共患疾病的生态条件,减少发病率并控制蔓延。

九、流行病传播的混沌态及涨落控制

Lorentz 提出的混沌一开始是针对大气物理问题,但其应用远远超出气象学和物理学范围。在医学中的具体应用,最早见于 Bruce(1990)和 Olsen(1990)的论著。而就大种群内呼吸道传染病——猩红热和流脑——问题的混沌研究(朱伟勇等,2001)实质上是一个大种群内部生物与生物关系的问题,发病者实为生态动力源,被传染者实为生态动力汇。用实际数据找出流行“阈值”,以控制流行涨落是医学生态控制的一个有效方法。

1. 分析过程

(1)是否具有混沌性

分析月发病数,以确定是否混沌,谱分析表明:猩红热有 11~12 个月循环期,谱峰周期为 11.2;而流脑的三个谱峰分别是 $T_1 = 11.5$, $T_2 = 5.8$, $T_3 = 3.9$,对应近似 1a, 0.5a 和 0.3a 的循环;再经由相空间重构及 Poincare 映象图分析,确认猩红热的流行过程非混

沌,而流脑的流行是混沌的。

(2)数学模造

①流脑迭代混沌模型

$$X_{t+1} = rX_t^2 \exp\{-0.003394(X_t - 14.41096)^2\}$$

式中, X 是流脑月发病时间序列的离散值, t 表示时刻, r 是流脑传播的涨落度,服从正态分布, $r \in [0.0241355, 0.2585946]$ 。

②Feigenbaum 倍分叉和 Ляпунов 指数分析

自 r_{∞} 迭代进入混沌状态,混沌区域中最大周期窗口是 $[0.086223, 0.0863776]$ 。根据流脑数据迭代模型,可绘出以 r 为横坐标,以 Ляпунов 指数的自然对数为纵坐标的图。

③在嵌入维数为 8 时,流脑数据的关联维数是 2.821。

2. 生态控制基本方案

对流行病传播动态过程,实施涨落度 r 的控制(主要是抓防疫),使流行过程落到周期区域,趋于稳定态不动点,这对控制流行病的传播是有意义的。

从以上分析的结果,可见掌握流行病多年大量数据,以便判断是否为混沌,如果混沌应作进一步分析,并根据涨落度加以控制,是混沌理论用于种群防疫(包括人,也包括家畜等动物防疫)的基本思路。而要实行这样的动态控制,则必须及时收集必要信息,并经由生态控制中心传播到各具体控制单位(如我国的各级防疫站、家畜卫生站等),这样的工作,可纳入整个生态信息网络之中。

十、可持续发展中的混沌与复杂性

混沌理论是非线性动力学的数学处理,它为了解自然界的不规则性即漂移性特征提供理论框架。混沌系统见于人类和动物种群之中,见于像森林、河流这样一些生物与生物物理系统之中,见于科学与工程的许多领域。一个混沌系统被定义为对初始条件显现出敏感性的系统。一个给定系统的初始状态的不确定性,不管它如何小,都可能扩大某些预测上的错误,导致未来动态估计的不准确性。

1. 社会与环境混沌系统:原理和实例

在自然界中,乱砍滥伐所引起的负面效应,比如:水土流失;涵养水源能力下降;调节径流能力降低;干旱加重;温度升高;生物多样性减少甚至某些野生生物灭绝。

2. 自组织动态的类型

研究者已经认识到,复杂系统的动态是不能通过一给定系统各自分量的分析来加以解释的。而动态似乎由各自分量的自发的相互作用(不可预知的)引起。这样的动态叫做“自组织”动态。混沌是远离平衡的自组织动态的一个本质特征。

自组织动态有多种类型。一种类型是“适应”。“适应”是处处可见的。企业对市场的适应,人的大脑对外界信号和内部信号的适应,免疫系统对感染的适应,以及人对变化着的环境的适应。另一种类型是“不适应”,比如说复杂系统有定位其自身于混沌边缘附近的倾向。这样的位置是新旧矛盾交叉地带。如果相对于初始条件的误差变得特别大,系统就必然崩溃。这种崩溃可能是突然的,尽管程度有些差异。在大系统中,参数多得不能控制。许多发展项目对于初始条件是敏感的。在一个项目的计划过程中,一些小的错误会成倍地放大,并终会成为大的错误。

参 考 文 献

- 王松霈等. 1992. 自然资源利用与生态经济系统. 北京: 中国环境科学出版社.
- 中国生态学会. 1991. 生态学研究进展. 北京: 中国科学技术出版社.
- 朱伟勇等. 2001. 猩红热和流脑流行过程的混沌分维研究. 数学的实践与认识, **31**: 331~334.
- 刘思峰等. 1993. 灰色系统学术论文集. 郑州: 河南大学出版社.
- 刘应明等. 2000. 模糊性——精确性的另一半. 北京: 清华大学出版社. 广州: 暨南大学出版社.
- 李光林等. 2001. 大中微量元素组合对水稻产量影响的灰色综合评判. 生物数学学报, **16**: 468~472.
- 汪培庄. 1985. 模糊集与随机集落影. 北京: 北京大学出版社.
- 张建树. 1998. 混沌生物学. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 曹鸿兴等. 1988. 灰色系统理论浅述. 北京: 气象出版社.
- 鳥谷均. 1985. 長野縣管平盆地における冷気湖の形成と冷気流. 地理評論, **58**: 67~79.
- Bruce, J. W. 1990. *Fractal Physiology and Chaos in Medicine*. Singapore: World Scientific Publishing House.
- Dent, J. B. and Blackie, M. J. 1979. *Systems Simulation in Agriculture*. London: Applied Science Publishers Ltd.
- Huisman, *et al.* 1999. Biodiversity of plankton by species Oscillations and chaos. *Nature*, **402**: 407~410.
- Huisman, *et al.* 2002. Oscillations and chaos generated by competition for interactively essential resources. *Ecological Research*, **17**: 175~181.
- James, W. C. 1974. Assessment of plant diseases and Losses. *Ann. Rev. Phytopathol.*, **12**: 27~48.
- Mauldin, J. M. 1990. Recognize problems in embryonic development. *Poultry*, **5**: 516~521.
- Olsen, L. F. *et al.* 1990. Chaos versus noisy periodicity: alternative hypotheses for childhood epidemics. *Science*, **249**: 499.
- Ott, E. 1993. *Chaos in Dynamical Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.

第八章 生态控制的运筹方法

在控制论中不包括运筹学,但这不排除用运筹学方法于生态控制原理与实践中。鉴于运筹学中的数学方法很多,并且在生态控制中有不同程度的应用,所以本章不可能一一阐述,而是在论述运筹学于生态控制的基本思路、原则的基础上,重点讲决策、Марков过程和博弈论中的 Nash 博弈在生态控制中应用问题。

第一节 运筹学与生态控制

一、对运筹学的认识

运筹学本身是数学的一个重要分支,该分支在系统和管理科学中的应用,构成了系统工程的先驱。说起运筹学,社会公众或许不十分理解,但其中的一些常用术语,可能为人们所熟知。比如说,线性规划,社会上许多人都会有所了解;在中国提到优选法,人们对华罗庚院士为其推广走遍大江南北的事迹,还记忆犹新。运筹学是英国英文(operational research)或美国英文(operations research)这一词组的汉译。operations research 的本意是“操作研究”或“作战研究”,因为研究乃至指挥作战一般说来要有个指挥的场所,在古代作战时,指挥官的指挥所设在军用的帐幕之中,这种军用帐幕叫做“帷幄”。早在汉代,我国就有“运筹帷幄之中,决胜千里之外”的名句,我国现代数学家从中引用“运筹”二字,将 operations research 正确地译为“运筹学”。至今,已基本通用,但也有些书包括汉译名著仍有将 operations research 译为“操作研究”的。迄今,运筹学已经发展成为一个包含许多分支学科的数学学科。

二、应用原理

关于运筹学主要分支及其在生态控制中的应用原理,我们将其概括为以下几点。

1. 规划论与生态控制

规划论是运筹学中发展最早,也是迄今为止发展得最完善的一个大的分支。主要包括线性规划(linear programming)、整数规划(integer programming)、非线性规划(nonlinear programming)、多目标规划(multiobjective programming)和动态规划(dynamic programming)。规划论用于生态控制的基本思路是使生态动力汇与相应的生态动力源相适应,比如在大范围生态县建设中,作出区域规划,使生尽其长,地尽其力,达到“宜农则农,宜林则林,宜牧则牧”的目标。

2. 决策论与生态控制

决策论也叫决策分析(decision analysis),它的最终目的是从若干个改善生态条件的行动中,合理地分析和决定满足人们生态控制要求的方案来。近年来,发展起来的 Марков 决策规划是依据 Марков 过程作决策的先进实用方法,在生态控制中已经有多方面应用。

3. 存贮论与生态控制

在生态控制中,经常遇到存贮问题,比如生态建设投资力度问题,水库蓄水量问题。这就需要用到数学中的存贮论(inventory control)加以解决,有时结合 Monte Carlo 方法进行模拟。

4. 排队论与生态控制

排队论(queueing theory)也叫随机服务系统,在种群生态控制中用得较多,如港湾鱼类产卵的生态问题,因为卵鱼产卵需要在一定的水文生态条件下进行,而环境往往限制卵鱼的到达,这就有一个排队问题。另一类是生态服务窗口设置如何满足社会需要并尽可能避免重复。

5. 对策论与生态控制

对策论(game theory)也叫博弈论,处理人与自然有竞争的生态控制问题,在生态控制中有多方面应用。

本章将结合具体生态控制问题,重点论述决策分析与博弈问题。

6. 与生态控制有关的一些其他运筹方法

图论、模拟,质量控制、模型论、可行性研究、统筹方法、投入产出分析等方法,也与生态控制有一定关联,必要时结合应用。

第二节 生态控制决策方法

本节在概论生态控制决策方法之后,例述多属性决策新方法在生态控制中应用的原理。

一、概论

决策俗称拍板定案,是现代运筹学的一个重要分支。它在生态控制中应用的比较系统的专门论述,至今并不多见;因为一谈到控制二字,研究者往往到控制理论中去找答案,其实这是囿于名词而陷入误区。如果我们回忆一下第一章中所说的 cybernetics 意即掌舵术,就会跳出原存于研究者头脑中的 ecological control 的框架,而自然会把决策方法纳入生态控制的范畴,因为决策论的确是为生态控制掌舵的一种不可忽视的方法。事实上,无论从古农书记载或者从生产经验来说,人们在生态林业、生态农业中,早已有决策思想于生态调节之中,在第三章里有所提及。比如早在两千多年前,用于指导种田的“三才论”,用于长远减灾的治本措施——植树造林;南北朝时,根据天气预报进行防霜决策——燃草增温。

人们在以往历史上形成的生态决策技术,大体经历了三种形态,或说三个发展阶段,至今三者仍在并用。第一阶段是经验的生态决策:凭决策者个人经验进行决策,如退耕还林、植树种草、建温室。第二阶段是参谋决策:生态决策者做决策时,不但凭个人经验,而且咨询身边或外请专职研究生态者为决策提供科学依据。这些被邀请者一般是掌握生态控制实践动态,了解国内外生态控制典型经验或有某方面学术造诣,能为决策人提供有益参谋见解的建议者。我国生态县(市)建设中,大都召开过多次专家咨询会。决策班子,在听取专家建议后,总结集体经验和智慧,作出有依据的决策。第三阶段是科学决策,即用生态控制原理和现代数学模型作出的决策,这种决策不是只凭个人零碎经验,也不是用定性方法总结别人经验,而是用科学计算,用系统工程方法处理,不懂系统科学甚

至不会应用数学模型者,是无法介入该阶段决策的。广义地说,许多数学方法对该决策起作用,狭义地说,运用决策技术(主要是决策论)是这方面的一种直接方法。

现代的决策论产生于 20 世纪 40 年代,在我国比较大规模的应用,约始于 20 世纪 70 年代末。决策在生态控制中的应用是为了达到某个特定的目标,而从各种不同的备选方案中选取最优方案的活动。就以防霜这个以增温来调节控制生物环境,以使生物不受冻害这一生态措施来说,人们在决策中可用的方案很多。这些方案的基本原理,是人们早就知道的。早在 20 世纪 50 年代中国科协所印发吕炯写的书,就总结了多种方法,直到现在,也基本上是那些,当然具体技术水平提高了很多。首先,用治本方法还是用治标方法,就有一个二者择一的决策,或标本兼治,三个方面选一的问题。而在治本方法中就有生物措施(如防霜林)或工程措施(如防霜堤)的选择问题。在治标措施中,有熏烟、灌水等方案。在过去,人们似乎尚不了解决策论的时候,往往是凭主观认识来决策。

现代决策论告诉我们,决策的第一步工作目标,比如防霜的目标是使生物环境增温、生物不致受害(即不产生或少产生负作用)、投资较少等。目标可以是单目标,也可以是多目标。

第二步是认识各种可行方案。这项工作生态控制问题中,一般是从机理出发、利用已有的研究结果,把可行方案摆出来。比如在防霜问题中,方案有:植防霜林,修防霜堤,熏烟,灌水(含漫灌、喷灌)。又如:在日光温室建设中,后墙的高度是高些还是低些;宽度是 60cm 还是 80cm;覆膜是一层还是两层;棚面方位是面向东些,还是面向西些?这都是长远性的决策问题。在日光温室运行中为防御霜霉病,是用调节空气流通(放风),改漫灌为喷灌,还是用药物防治?只有把方案列出,才有供选择的余地。

决策的第三步是从备选方案中选最优,这正是利用决策论于生态控制实践的核心与关键问题。到目前为止,决策论的数学方法已有很多。从类型来说,有确定型的决策,也有随机风险型的决策。根据我们的经验,以后者为多。从已有十分丰富的数学决策方法中,选择出最适宜于我们面临的千差万别的生态控制问题,这本身也是一种决策,也可以说是一种技艺,需要生态工作者随时跟踪数学方法的发展,同时及时发现生态控制的问题,以数学上决策方法之“矢”射生态控制决策所面临问题之“的”。而所用数学方法,以新的且较完善的为好,在这一节中,我们不可能也没有必要将作者曾经用过的许多决策论方法面面俱到地加以论述,而只选一些新方法,结合生态控制加以例述。有一种似乎更为重要的马氏决策过程涉及随机过程且所需篇幅略长,我们在本章第三节作专门论述。

二、生态控制多属性决策

徐泽水(2002)研究了属性权重完全未知、属性值为区间数目、对方案有偏好的多属性决策问题,提出了一种基于相离度的求解属性权重公式,并利用区间数比较的可能度,对决策方法作排序

具体算法是:

第一步,设多属性决策问题的方案集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 属性集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。给出方案 x_i 在属性 μ_i 下的属性值 a_{ij} [这里 $a_{ij} = (a_{ij}^r, a_{ij}^U)$], 从而构成决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$;

第二步,将决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 转化为规范矩阵 $R(r_{ij})_{m \times n}$ (具体方法略);

第三步,求最优权重向量 W 和各方案综合属性 $Z_j (j \in N), N = \{1, 2, \dots, n\}$;

第四步,算出各方案综合属性之间的可能度 $P_{ij} = P(Z_i \geq Z_j)$, 并建立可能度互补矩阵 $P = (P_{ij})_{m \times n}$;

第五步,求出矩阵 P 的排序向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$, 再按其大小次序,对方案排序并择优。

让我们举出生态县建设中选择重点发展乡(镇)事例。

某生态县欲选择一个重点乡(镇),把全县 28 个乡(镇)列入候选对象。在调查考核之前,从生态控制原理出发确定了 6 项考核指标(认定其为所说的“属性”):

- ①森林覆盖率 μ_1 ;
- ②草地和牧业开发状况 μ_2 ;
- ③保护设施暨工厂化农业效益 μ_3 ;
- ④水域开发及水产经济 μ_4 ;
- ⑤大气(主要指局地气候和小气候)、地貌、水文、土壤等非生物生态动力源保障能力 μ_5 ;
- ⑥人工能值供应水平 μ_6 。

然后,请各方面专家共同评议。经统计处理,从中确定 J 个乡(镇) ($J < 28$) 为候选单位,可以参评(事实上淘汰了 $28 - J$ 个单位)。候选单位即元素 $x_i (i = 1, 2, \dots, J)$ 。由于专家对各个候选单位所给出的属性值不同,所以首先统计各项指标下的属性值。依属性数据,建立决策矩阵 A , 再将 A 转化为规范化矩阵 P 。接着就决策者偏好,对结果进行订正。最后,给出排序向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)^T$, 如果结果是 $\omega_1 > \omega_3 > \omega_5 > \omega_2 > \omega_4$, 则在这 5 个单位中,优先选择编号为 1 的单位,接着的选择则依次是编号为 3, 5, 2, 4 的单位。

由于有相应的软件,生态控制决策者可将有关调查数据输入即得结果,而无须一一计算乃至把时间消耗在具体步骤上。

不难看出,这种客观决策,仍有以专家主观认识为基本资料的过程,所以,要使决策科学化,决策者所请专家合适与否是关键。请什么样专家合适呢? 最好请以定量研究为基础再进行赋分的专家,这样专家评分依据就比较充分些。另外,当然尽量请与被评审对象没有直接的经济或社会关系的专家。

三、自然资源与生育率决策模式

在以前的研究中,多考虑人口增加对自然资源的影响,现在也有人反过来研究资源对人口出生率暨人口增长率的影响,Aggarwal 等(2001)就南非的具体情况建立了出生率模式的理论框架。

Aggarwal 等建立的效用函数(utility function)是

$$U = U(N, q, z) \quad i = 1, 2, 3 \text{ 时 } U_i > 0 \quad (8-1)$$

式中, N 是儿童数目, q 是每个儿童的质量, z 是集合消费量。

在这一模式中,儿童质量指儿童的健康和营养状况。因此,儿童质量的较高水平也意味着有较好的成长机会。妇女出于自己的目的关心儿童的质量,哺育条件较好的比较健康的儿童,预期对家庭生产有较多贡献,有更多的机会成为有用人才。假定同胞儿童质量是不变的,它是母亲投入时间 T_q 、购入物品 x_q 和资源退化或短缺量数 s 的一个函数

$$q = q(T_q, x_q, s)$$

$$q_1 > 0 \quad q_2 > 0 \quad q_3 < 0 \quad (8-2)$$

在公式(8-2)中,儿童质量被假定为 s 的减函数,其意义是资源退化对儿童健康起到负作用。特别是,来自发展中国家的大量研究指出饮用水与儿童死亡率之间的明显相关关系(Strauss *et al.*, 1995)

最后,集合消费量 z 的函数是

$$z = z(T_z, t_z, x_z, s)$$

$$z_1 > 0, z_2 > 0, z_3 > 0, z_4 < 0 \quad (8-3)$$

式中, T_z 是母亲的投入时间, t_z 是儿童的时间输入, x_z 是购买物品的输入, z 可以被认为是由母亲评价的不同消费品的集合。这些消费品当中的一种是熟食、制作熟食需要输入食品原材料、燃料、水和劳动力。按照这种解释,将 s 作为 z 生产中的一个输入,似为合理。同时,假定退化了的的环境导致 z 的较低值和其他输入的较低产出(对于 $i = 1, 2, 3$ 来说, $z_{i4} < 0$)。也应注意到儿童对这种集合物品生产的贡献。

妇女的全部时间 T 分配于如下活动:生小孩(T_N),在儿童质量方面的投入 T_q ,生产 z (T_z)以及在劳动市场中的工作 T_L 。并可算出

$$T = NT_N + NT_q + T_z + T_L \quad (8-4)$$

假定儿童的时间 t 投入到集合物品的生产。注意到儿童生产力取决于其质量,于是按质量单位来说,儿童的时间限制是:

$$t_z = Nqt \quad (8-5)$$

全收入平衡限由下式给出:

$$P(Nx_q + x_z + Nx_N) = wT_L + V \quad (8-6)$$

式中, P 是物品的市场价格, w 是工资率, V 是非劳动收入。利用式(8-1)至(8-6),使(8-1)最大的 N, T_q, X_q 和 T_L 的一阶条件分别是

$$U_1 - U_3 z_1 (T_N + T_q) + U_3 z_2 qt - U_3 z_3 (x_N + x_q) = 0 \quad (8-7)$$

$$U_2 q_1 - U_3 z_1 N + U_3 z_2 Nt q_1 = 0 \quad (8-8)$$

$$U_2 q_2 - U_3 z_3 N + U_3 z_2 Nt q_2 = 0 \quad (8-9)$$

$$U_3 z_3 (w/p) - U_3 z_1 = 0 \quad (8-10)$$

由方程(8-10)得

$$z_1/z_3 = w/p$$

由(8-8)得

$$q_1 (U_2 + U_3 z_2 Nt) = U_3 z_1 N$$

由(8-9)得

$$q_2 (U_2 + U_3 z_2 Nt) = U_3 z_3 N$$

于是,

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{U_3 z_1 N}{U_3 z_3 N} = \frac{z_1}{z_3} = \frac{w}{p}$$

即有

$$z_1/z_3 = q_1/q_2 = w/p$$

这是一种标准条件。

方程(8-7)可改写为

$$U_1 + U_3 z_2 q t = U_3 z_1 (T_N + T_q) + U_3 z_3 (x_N + x_q) \quad (8-11)$$

方程(8-11)的左边表示,作为物品纯消耗者和物品生产者的儿童的双重函数的边缘利益。右边表示儿童的边缘支出,因为儿童先消耗累积物品,包括:母亲的时间,市场物品和为儿童质量所工作的投入。

对方程(8-7)至(8-10)可以求解。有意义的是关于儿童方程的简化形式:

$$N^* = N^*(s_1, w, p, V) \quad (8-12)$$

由于多重影响,资源短缺不能满足儿童需求的作用是复杂的。许多有意义的比较稳定结果关系到模式中的外源变量,对这些,Aggarwal(2001)论述了估计方法,利用来自南非乡村的家庭数据,具体研究了薪炭林、水资源短缺对生育率的影响。结果表明,薪炭林的影响是显著的,而水资源短缺的影响,不够显著。

第三节 生态控制的 Марков 决策过程(MDP)

本节在简述 MDP 用于生态控制原理之基础上,举出平均模型之例。

一、MDP 用于生态控制的现实性与前景

Марков 决策过程(Markov Decision Processes)也称为 Марков 决策规划(Markov Decision Programming)或 Марков 控制系统(Markov Control System)(一般简记 MDP)是研究一类随机序贯决策问题的理论。所谓随机序贯决策问题,是指在一系列相继的或连续的时刻(称之为决策时刻)点上作出决策,在每个决策时刻点,决策者根据观察到的状态,从可用的若干决策中选择一个,将决策付诸实施后,系统将获得与所处状态和所采取措施有关的一项报酬,并影响下一个时刻点系统所处状态。决策的目标是使系统运行,在某种意义上达到最优。Марков 决策过程是研究 Марков 型序贯决策的,是我们在本书第四章所讲动态规划与 Марков 过程相结合的产物。由于在生态控制的许多优化问题中,具有 Марков 性的无后效随机过程是很多的,如植物的生态产量一般是由其生长期各生态动力源因子共同决定的,比如说玉米生育期需要大量的水分,如非灌溉的,则旱年,生态产量总是负值,如干旱这个水文生态动力源只能左右当年玉米的生态产量,而与次年或其前若干年,基本无关,所以是具有 Марков 性质的,这样一来,用 Марков 决策就适宜,因为这种决策手段不像我们在第四章所讲的以 Bellman 的“最优化原理”作为研究的出发点,而是从一些简单的,易于验证的条件(或公理)出发来严格证明“最优化原理”。MDP 运用中所需的条件,往往在生态控制的许多基础研究中已经具备,这主要是源与汇之间的若干关系,像蝗虫发生与旱涝关系,工厂化设施农业中霜霉病与湿度关系,动物舍饲环境中,生态增重与空气中气体含物关系,流行病发生与寒潮关系,森林演替与环境关系等等。可见,即使就生态控制的直接应用,Марков 决策过程,尚可在很多领域发挥作用。进一步考虑到大系统,复杂巨系统的生态建设投资决策方案经济与生态关系问题,它的应用领域更可大大拓宽,并以此服务于客观生态控制。1997 年度诺贝尔经济学奖得主 Merton(1998)将 MDP 视为经济研究的重要工具,这启发我们在有条件时可参考 Merton 思路,用 MDP 于生态经济决策之中。

二、一些基本概念、符号与模型应用途径

1. 离散时间 DTMDP 的基本组成部分

最为基本的离散时间 Марков 决策过程(Discrete Time Markov Decision Processes, 简记为 DTMDP)的模型由以下的五重组组成

$$\{S, (A(i), i \in S), q, r, V\}$$

这里 S 为系统一切可能的状态所组成的非空的状态集, 亦称状态空间, 为简便, 本节假定 S 为一有限集。 $A(i)$ 是在状态 $i \in S$ 条件下, 状态 i 可用的行动集, 本节假定为非空、有限。 q 是系统状态的转移律族, 假定为时间齐次的 Марков 转移律族。 r 是定义在 Γ 上的报酬函数, 这里令 $\Gamma = \{(i, a) : a \in A(i), i \in S\}$, $r(i, a)$ 表示在任一时刻 t , 系统处于状态 i , 选用行动 a 时所获报酬。 V 是准则(criteria), 它是定义在 $\Pi \times S$ 上的单值实函数, 这里 Π 是全体允许策略集, S 是状态空间。当以上的 $S, (A(i), i \in S), q, r, V$ 都给定时, 即认为给定了一个具体的 DTMDP 模型。

2. 策略(policy)类

(1) 定义在空间 S 上的映像 f , 使得对于每个 $i \in S$ 来说, 有 $f(i) \in A(i)$, 则称 f 为决定性决策规则, 或称之为决策函数。

(2) 任一决策函数序列 $(f_0, f_1, f_2 \cdots) = \Pi, f_t \in F, t \in \mathcal{N}$ 。就称为是一个(决定性)马氏策略。

(3) 若在时刻 t 选用行动的规划 π_t , 不仅是随机的而且依赖于系统在 t 以前的历史, 则 $\pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \cdots)$ 称为策略, 全体策略集记为 Π , 称 i 为策略空间。

(4) 设 $\pi = (f_0, f_1, f_2, \cdots) \in \Pi_m^d$, 若对每个 $t \in \mathcal{N}$, 均有 $f_t = f_0$, 则称为平稳策略, 记作 f_0^∞ , 全体平稳策略构成的集, 称为平稳策略类, 记为 Π_f^d 。

3. 准则

准则有阶段准则、折扣准则和平均准则。在生态问题中, 前两种准则及其运用的数学模型计算过程已分别在《生态动力学》(裴铁璠等, 2001)一书的第十二章第四节和第九章第五节例述, 在生态控制中完全可以参照应用。其中的有限阶段模型主要用于即时的分阶段决策。除了在果树防风决策(是治标措施, 也是一种“战术”上的决策)之外, 我们已经实用过或准备应用的生态控制领域还有: ①日光温室霜霉病防御(生态措施如放风或化学措施如喷百菌清)决策; ②水库防洪兴利决策; ③大田作物抗旱排涝决策; ④防霜冻、冷害等低温灾害的即时决策。关于折扣模型, 主要用于长远性生态建设决策, 除在农产品鲜贮环境建设(主要目标是调节温度)中应用外, 还有: ①塑料大棚覆膜层数(单层还是双层)决策; ②防护林结构(如透风结构, 疏透结构等)③防风网眼大小的决策; ④套作农田中, 高秆作物行数(单行或双行)的决策。这类决策, 一经作出, 在一定期间内, 不能作即时调节, 如塑膜在冬半年不能调节, 套作作物在当年不能调节, 防护林在几年内不能调节。另一种是平均模型, 过去未曾述及, 将作为本节的一个主要部分具体论述。

三、MDP 平均模型的应用

有一个生态农场(或生态县、乡)生产大农业方面的各种农产品(含种植、养殖、林木、花卉、鱼类等水产), 由于其生产活动——无论是露天生产或设施农业生产——都离不开

各种生态动力源(旱涝、土地盐碱化、温热充足、水土流失等)的变化性、所以管理者每年对当年的生态动力源作回顾,请专家评估,以期找出翌年防灾减灾的生态控制依据,从而夺得两高一优(高产、优质、高效)。尤其是不断提高生态产量,综合起来的生态条件,大体分为两类,一是生态动力条件好,即灾害少,我们称之为生态良好年,简称“良好年”,二是“多灾年”,假定“多灾年”和“良好年”与人的活动有关,即不完全取决于自然,如降水量大,在水利设施差的时候,形成涝灾,在设施好时,可能不成为涝灾。我们把前者记为状态 1,把后者记为状态 2。并且,如果为良好年,一年可获生态-经济效益(注意,这是按生态产量算出的效益,不含基因产量和随机产量创造的效益,所以不能视为实际效益,下同)6000 万元;如果为多灾年,生态-经济效益为 3000 万元。

对于每个状态来说,可用的行动有两种:

一般防御(因为在良好年,也要有一定防御准备,对于不同生物自然条件不可能全为有利的),记作 b ;强化防御,记作 c 。假定在一般防御条件下,不须付出费用,而在强化防御条件下,须花费 2000 万元的防御费。

又假定:处于状态 1,采用行动 c ,由于各种随因素的干扰,翌年仍处于状态 1 的概率是 0.8,转为状态 2 的概率是 0.2;如果处于状态 1,采用行动 b ,下一年仍处于状态 1 的概率为 0.5,转为状态 2 的概率也为 0.5。在处于状态 2 的条件下,采用行动 b ,由于各种随机因素的干扰,下一年转为状态 1 的概率为 0.4,仍处于状态 2 的概率为 0.6。如果在处于状态 2 的条件下,采用行动 c ,下一年转为状态 1 的概率为 0.7,仍处于状态 2 的概率为 0.3。

现用 Марков 决策过程的平均准则(更深一步原理,见胡奇英等,2000),用策略迭代算法求最优策略。

根据所设条件,该问题有 4 个决策函数,令其分别为(参见表 8-1): $f^1(1)=c, f^1(2)=b$; $f^2(1)=c, f^2(2)=c$; $f^3(1)=b, f^3(2)=c$; $f^4(1)=b, f^4(2)=b$ 。首先注意到,对该例的每个决策函数所决定的随机矩阵,即状态一步转移矩阵 $Q(f)$ 均满足假设 A——对任一给定的决策函数 $f \in F$,状态一步转移矩阵 $Q(f)$ 均仅有一个遍历类。所以有关策略迭代法的全部定理和运算规则都是可用的。

表 8-1 Марков 决策过程计算用表

状态 i	行动 a	转移概率		报酬 $r(i,a)/10^7$ 元
		$q(1/i,a)$	$q(2/i,a)$	
1	b	0.5	0.5	6
	c	0.8	0.2	4
2	b	0.4	0.6	-3
	c	0.7	0.3	-5

具体计算步骤如下:

①取 f^1 作为初始策略,即 $f_1 = f^1$;

②对于 f^1 作策略求值运算,即解策略求值方程

$$r(f^1) + Q(f^1)U(f^1) - U(f^1) - U(f^1)1 = 0 \quad (8-13)$$

由表 8-1,我们有

$$r(f^1) = \begin{bmatrix} 4 \\ -3 \end{bmatrix}$$

$$Q(f^1) = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

根据董泽清等对式(8-13)的处理方法,并令

$$U(f^1; 1) = 0$$

则可得出如下形式的方程组

$$\begin{cases} \alpha + \beta U(f^1; 2) - v(f^1) = 0 \\ \gamma + \delta U(f^1; 2) - v(f^1) = 0 \end{cases} \quad (8-14)$$

式中, α, β, γ 和 δ 都是具体数字。

又据董泽清等的计算结果,这里有

$$U(f^1; 2) = -\frac{35}{3}$$

$$v(f^1) = \frac{5}{3}$$

可以求得 $v(f^2) = 2, v(f^2; 1) = 0$ 及 $U(f^2; 2) = -1$ 。

③策略改进运算

$i=1$ 时,由表 8-1 得

$$t_1(c) = 0$$

$$t_1(b) = 6 + 0.5U(f^2; 2) - 2 = 6 + 0.5 \times (-10) - 2 = -1 < 0$$

所以,我们有

$$t_1 = \max\{t_1(b), t_1(c)\} = 0$$

于是

$$f_3(1) = f^2(1) = c$$

$i=2$ 时

$$t_2(c) = 0$$

$$t_2(b) = -3 + 0.6U(f^2; 2) - U(f^2; 2) - v(f^2) = -3 - 0.4 \times (-10) - 2 = -1 < 0$$

所以,我们有:

$$t_2 = \max\{t_2(b), t_2(c)\} = 0$$

于是

$$f_3(2) = f^2(2) = c$$

④进一步策略改进运算

$i=1$ 时,由表 8-1,我们有

$$t_1(c) = 0$$

$$\begin{aligned} t_1(b) &= \max_{a \in A(i)} \{r(i, a) + \sum_j q(j/i, a)U(f; j) - v(f)\} \\ &= r(1, b) + \sum_j q(j/1, b)U(f^1; j) - v(f^1) \\ &= 6 + 0.5U(f^1; 2) - v(f^1) \\ &= 6 + 0.5 \times \left(-\frac{35}{3}\right) - \frac{5}{3} \\ &= 6 - \frac{22.5}{3} < 0 \end{aligned}$$

因此,有

$$t_1 = \max\{t_1(b), t_1(c)\} = 0$$

于是

$$f_2(1) = f^1(1) = c$$

$i=2$ 时

$$t_2(b) = 0$$

$$t_2(c) = -3 + 0.3 \times \left(-\frac{35}{3}\right) + \frac{35}{3} - \frac{5}{3} = -5 + \frac{19.5}{3} > 0$$

故有

$$t_2 = \max\{t_2(b), t_2(c)\} > 0$$

于是

$$f_2(2) = c$$

综上可得

$$f_2 = f^2$$

即 $f^{2\infty}$ 为一改进策略。

⑤ $f^{2\infty}$ 作策略求值运算

由表 8-1 可得

$$r(f^2) = \begin{bmatrix} 4 \\ -5 \end{bmatrix}$$

及

$$Q(f^2) = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.7 & 0.3 \end{bmatrix}$$

求解

$$r(f^2) + Q(f^2)U(f^2) - U(f^2) - v(f^2)1 = 0$$

用分量来写,并令 $U(f^2;1)=0$,式(8-14)成为

$$\begin{cases} 4 + 0.2U(f^2;2) - v(f^2) = 0 \\ -5 + 0.3U(f^2;2) - U(f^2;2) - v(f^2) = 0 \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} 4 + 0.2U(f^2;2) - v(f^2) = 0 \\ -5 - 0.7U(f^2;2) - v(f^2) = 0 \end{cases}$$

由定理“策略迭代算法经有限次迭代必将终止。并终止于一个最优“策略”(董泽清,1981;胡奇英,2000)可知 $f^{2\infty}$ 关于平均准则是最优的,而且最优值 $v^* = v(f^2) = 2$ 。

四、问题与前景

从以上简单例子可知,用 MDP 平均模型可求出依赖于给定状态和转移概率采取优化措施。但是,在实际应用中,比较准确的转移概率是不易求出的,这必然影响决策的质量、所以在实际应用中,目前还不能完全按决策结果办事。

MDP 平均模型的算法,不限于策略迭代一种,尚有线性规划算法,偏向最优策略等。对于这些及以后可能出现的更新方法,在生态控制中都是有用的,条件很复杂时,就会使表 8-1 那样的表变得很庞大,但因已有计算机系统分析人员设计好许多种语言的程序,生态控制者可当广泛应用,而无需自编程序运算。

尽管具体操作起来,有许多不准确之处,但随着生态控制原理的发展,数学上的算法及相应软件的完善,作为一种运筹方法的 MDP 方法在生态控制领域应用前景当是十分广阔的。

第四节 生态控制的 Nash 博弈

博弈论亦称对策论(game theory),这是运筹学的一个重要分支,英文字面意义是“关于游戏的理论”,该理论的实质是有利害冲突即有竞争的各方参加的决策问题,或简言之曰有竞争的决策。我国战国时期“齐王与田忌赛马”的故事(《史记·孙子吴起列传》)就是博弈论中的一个典型例子,用现代博弈论观点看,属于“二人零和对策”。现代数学中作为运筹学分支之一的博弈论的初创以 J. von. Neumann(1903~1957)专著《博弈论与经济行为》的出版(1944 年)为标志。1950 年, J. Nash(1928~)的博士论文,实际上使博弈论走向一个新的境界,推动了博弈论在经济领域中应用的进展。Nash 博士论文的重要意义是在其发表后的若干年才被认识到的。Nash 因其在博弈论方面的突出的奠基性贡献而获得 1994 年诺贝尔经济学奖。2002 年 8 月, Nash 出席在北京举行的世界数学大会并在会上作了报告,又应北京大学等单位邀请作专题报告,接受多家新闻媒体采访,于是使 Nash 成为中国包括生态学界在内的科学界乃至社会公众关注的人物之一。

今日的博弈论,发展迅速,基础严谨,内容丰富,博大精深,因而其学科辐射能力极强,许多科学工作者对它兴趣盎然,但不熟悉数学模型者,往往望而却步,以致它在生态控制领域中的应用举步维艰。但我们相信,它在生态-经济领域中的应用,前景可观。

在这一节,我们不准备全面介绍博弈论,而只从生态控制角度出发,就与 Nash 均衡有关的定理在生态控制中的应用问题,举例说明用于生态-经济控制的若干主要方法。

一、概述 Nash 均衡及其生态应用

在 Nash 均衡提出之前,数学上所讲的博弈均衡(如前述的“齐王与田忌赛马”)都是严格优势策略(系“全面的严格的优势策略”的简称,这种策略指的是:“无论对方采取什么策略,我方所采取的策略总比采取其他任何策略都好,而且确实显示出好来。被全面的严格的优势策略压倒的那个策略,才叫做严格劣势策略”)。

在博弈双方都没有“全面的劣势策略”的情形下,还要求作出选择。在博弈论中的一个重要概念——Nash 均衡,它指出一大类[如“情侣博弈”(battle of sexes games)]策略优势不那么明显的博弈的结局。所谓策略优势不明显,指的是博弈双方都没有“不论对方采取什么策略,我方总是采取这策略为好,而且是严格地好”这样的严格策略,其实,人们总是留意一种双方“相对优势策略”的组合。比如,在局部的陆地生态控制措施中,在这种改造自然的生态博弈中,有人提出应植树,有人提出应种草,双方都去植树或双方都去种草,是博弈的两个 Nash 均衡。下面举例说明。

1. 生态控制的两个例子

第一个例子是生态县建设中作物种植类的例子。假定甲和乙都是农业生态专家,来到某一生态县考察。根据该县各方面的生态动力条件,他们对利用这些条件种植作物的种类分别提出建议:甲偏向种玉米,乙偏向种高粱。这样,他们二人所面临的抉择,可表示为如下的博弈。

		乙	
		玉米	高粱
甲	玉米	3,2	1,1
	高粱	1,1	2,3

在这个博弈中,有两个用黑体数字表示的 Nash 均衡,一个是两人都赞同种植玉米,甲得 3,乙得 2;另一个是两人都赞同种高粱,甲得 2,乙得 3。Nash 均衡是稳定的,就是说:处于 Nash 均衡的时候,任何一方都是不想单独改变策略选择,因为单独改变不会给哪一方带来好处。

第二个例子是植树、种草的对策问题,是有“情侣博弈”性质的策略格局。为了改善大农业乃至整个社会的生态环境,建设生态县,通过有计划的植树种草使所建生态县拥有可持续发展的环境,相邻的甲乙两个生态县(旗)面临“集中资源主要支持甲县 A 专家(这里说的专家指有造诣的生态—经济专家,下同)还是主要支持乙县 B 专家”的抉择。如果甲、乙两个县集中资源主要支持甲县 A 专家,甲县得 4,乙县得 3;如果集中资源支持乙县 B 专家,甲县得 3,乙县得 4。如果分散资源,各自建设本县的生态环境,那么因为都是在利用人工生态动力资源环境增优的工作,所以还是会取得成功的,但是,达到某目标的历程肯定会长,即建设是慢步进行的。其实这就是数学上所说的普通 Nash 均衡——单独把策略从均衡中改变出去,不会得到好处,但没有好处,也不是一定有坏处。如果乙县支持 B 专家,甲县支持 A 专家,则两县各得 2;如果颠倒过来,乙县支持 A 专家,甲县支持 B 专家,则两县各得 1。所以甲乙双方博弈的形势如下

		乙县	
		A 专家	B 专家
甲县	A 专家	4,3	2,2
	B 专家	2,2	3,4

第一个例子所讲的“种植高粱玉米”的矩阵中每个数字都加 1,即得上示关于甲乙两县支持策略的博弈矩阵。这个博弈亦有两个 Nash 均衡——一个是集中资源支持 A 专家;另一个是集中资源支持 B 专家。

2. 混合策略 Nash 均衡的计算

为了改善生态条件,有植树、种草两项措施。这个博弈的纯策略的 Nash 均衡如下图所示

		乙	
		植树 q	种草 $1-q$
甲	植树 p	3,2	1,1
	种草 $1-p$	0,0	2,3

该均衡即是左上方一起已选植树,右下方一起选种草。为了计算混合策略 Nash 均衡,现假定,甲选植树的概率是 p ,选种草的概率是 $1-p$;乙种植树的概率是 q ,选种草的概率是 $1-q$ 。利用反应函数计算过程,可以把甲的期望得益 $U_{\text{甲}}$ 整理如下:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{甲}} &= 3pq + 1p(1-q) + 0(1-p)q + 2(1-p)(1-q) \\
 &= 3pq + p - pq + 2 - 2p - 2q + 2pq \\
 &= 4pq - p - 2q + 2 = p(4q - 1) - 2(q - 1)
 \end{aligned}$$

据此,甲的最佳反应函数是

$$p = \begin{cases} 1 & \text{如果 } q > 1/4 \\ [0, 1] & \text{如果 } q = 1/4 \\ 0 & \text{如果 } q < 1/4 \end{cases}$$

同样,把乙的期望得益 U_Z 整理如下:

$$\begin{aligned} U_Z &= 2pq + 1p(1-q) + 0(1-p) + 3(1-p)(1-q) \\ &= 2pq + p - pq + 3 - 3p - 3q + 3pq \\ &= 4pq - 2p - 3q + 3 \\ &= q(4p - 3) + 3 - 2p \end{aligned}$$

据此,其最佳反应函数是

$$q = \begin{cases} 1 & \text{如果 } p > 3/4 \\ [0, 1] & \text{如果 } p = 3/4 \\ 0 & \text{如果 } p < 3/4 \end{cases}$$

现在,把两人的最佳反应函数画在一起(如图 8-1),得到三个交点: $(p^*, q^*) = (0, 0)$, $(p^*, q^*) = (3/4, 1/4)$ 和 $(p^*, q^*) = (1, 1)$ 。

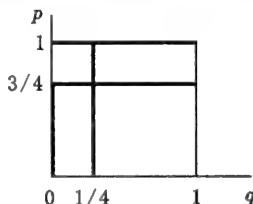


图 8-1 两人最佳反应函数的合成

其中, $(p^*, q^*) = (0, 0)$ 和 $(p^*, q^*) = (1, 1)$ 这两个 Nash 均衡就分别是两人一起选植树的 Nash 均衡和两人选种草的 Nash 均衡。可见,反应函数交叉法也可以把纯策略 Nash 均衡找出来,只是计算反应函数的工作量大。但是另外一个 Nash 均衡,以前用劣势策略消去法和相对优势策略圈定法是做不出来的,这说明反应函数法的价值。

算出 $(p^*, q^*) = (3/4, 1/4)$ 这个 Nash 均衡,看看它的含义是什么。这个 Nash 均衡是说,既然甲偏向植树,他最好以 3/4 即 75% 的概率选择种草;既然乙偏向种草,他最好以 1/4 即 25% 的概率选择种草。

如果甲以 3/4 的概率选择植树,乙以 1/4 的概率选择植树,那么甲的期望得益是

$$\begin{aligned} U_{\text{甲}} &= p^* (4q^* - 1) - 2(q^* - 1) \\ &= 0 - 2 \times (-3/4) \\ &= 3/2 \end{aligned}$$

而乙的期望得益是

$$\begin{aligned} U_Z &= q^* (4p^* - 3) + 3 - 2p^* \\ &= 0 + 3 - 3/2 \\ &= 3/2 \end{aligned}$$

两个期望得益都小于两人一起选择植树 ($U_{\text{甲}} = 3, U_Z = 2$) 的情形,即 $3/2 < 3, 3/2 < 2$;也都小于两人一起选择种草 ($U_{\text{甲}} = 2, U_Z = 3$),即 $2/3 < 2, 2/3 < 3$ 。可见,纯策略 Nash 均衡比混合策略 Nash 均衡具有支付优势,得益优势。局中人的境况,处于纯策略 Nash 均衡的时候,比处于混合策略 Nash 均衡的时候好。

在这种纯策略 Nash 均衡和混合策略 Nash 均衡都存在情形下,博弈论当然把优先权给予纯策略的 Nash 均衡。所以,就甲和乙决定选择植树,还是选择种草的博弈中,结局不是共同选择植树,就是共同选择种草。这两个 Nash 均衡都是绝对的得益优势。所谓绝对优势,指的是两人的情况都变好,而不仅是两人的情况加起来变好。现在的纯策略(无论是得 3,还是得 2)都比混合策略 Nash 均衡(各人都得 $2/3$)好,所以是绝对优势。

二、谈判问题的 Nash 定理及其在生态控制中的应用

在生态方面,竞争问题是很多的,比如自然资源利用,减轻自然灾害手段的选择,生态科技研究开发项目的竞争,研究职务的竞聘以及生态建设项目资金的合理分配等。在这类具有竞争性的决策中,决策者一般要动态地思考问题(注意竞争对手是动态的),不回避不确定性,而是设法从不确定性中找出确定性来,并力戒决策中的失误。

在竞争领域,谈判是经常的,有位名人曾说过:“没有不妥协的谈判。”其实,所谓谈判乃是竞争各方揭示共同利益取得妥协来尽可能维护各自的自身利益的活动,在生态方面,尤其是在生态建设这样的涉及经济问题的竞争中,谈判是经常在进行着的。比如生态县建设项目资金分配的谈判,各单位,各行业间必须进行,像“宜农则农,宜林则林,宜牧则牧”,这样的生态学常说的话,实际上富含竞争决策之意义;只有通过谈判,才能共同分配资金,使当事者心悦诚服。我国研究谈判的人,鉴于中国古代伐谋与伐交的传统,重视研究从《道德经》《孙子兵法》和《鬼谷子》等经典著作中吸取营养,古为今用。但在现代,利用博弈论的新成果于生态控制的谈判,尤其重要。

在生态控制对策领域中,不同学科的专家学者,不同领域的管理者,对生态控制措施提出不同的意见,是正常的事。为了确定最终的优化方案,开展讨论,各抒己见,是必要的。像这样的关于生态控制的讨论会,10 多年来,举行过多次。这实际上是持有不同意见的竞争双方的一种谈判,这说明在生态控制不同见解的竞争中,谈判是经常采用的一种手段。所谓谈判,乃是处于竞争状态的各方通过揭示共同的利益,取得妥协,尽可能维持各自利益的活动,就以土地利用来说,比如,生态专家倾向生态林发展,畜牧专家希望多开发草场,农业专家希望多种粮棉,水产专家希望多建鱼塘等等。研究运筹学博弈论的学者,自数学家 J. von Neumann 以来提出“二人零和对策”等数学模型,作为定量谈判工具。其实,我国早在两千多年前,在《老子》《孙子》等就有竞争决策思想。

1. Nash 公理体系

在这里,让我们介绍 Nash 关于谈判问题的基本公理,它具有方法论的价值。

设甲、乙两方,处在竞争之中,其效用函数分别记为 u, v , 并假定

$$(u, v) \in S$$

S 是平面上的有界凸闭集(叫做可行集),又设

$$(u^*, v^*) \in S$$

为一个点,其分量 u^* 和 v^* 分别表示在谈判前,甲、乙可望取得的效用值。谈判的解决过程是:从 (u^*, v^*) 出发,在 S 内找出点 (\bar{u}, \bar{v}) , 使双方都同意以其作为所取的效用值。我们将 (\bar{u}, \bar{v}) 称为谈判的解,并记作

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \varphi(S, u^*, v^*)$$

Nash 经多年研究,指出 φ 作为映射,应满足以下公理:

$$\text{公理 1} \quad (\bar{u}, \bar{v}) \geq (u^*, v^*)$$

(8-15)

这一公理表示谈判使双方效用值不低于谈判前的水平,说明了谈判的必要性。

$$\text{公理 2} \quad (\bar{u}, \bar{v}) \in S \quad (8-16)$$

这一公理表明, (\bar{u}, \bar{v}) 是可行点。

$$\text{公理 3} \quad \text{如果 } (u, v) \in S, \text{ 且} \quad (u, v) \geq (\bar{u}, \bar{v}) \quad (8-17)$$

那么,我们有

$$(u, v) = (\bar{u}, \bar{v})$$

这一公理也叫做 Pareto 最优性公理,它表明不会有其他点比 (\bar{u}, \bar{v}) 更优,也显示 (\bar{u}, \bar{v}) 的惟一性。

$$\text{公理 4} \quad \text{如果存在 } T \subset S, (\bar{u}, \bar{v}) \in T \text{ 并有} \quad (\bar{u}, \bar{v}) = \varphi(S, u^*, v^*) \quad (8-18)$$

那么,我们有

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \varphi(T, u^*, v^*)$$

这一公理说明:如果大谈判问题 (S, u^*, v^*) 的解 (\bar{u}, \bar{v}) 恰巧是小谈判问题 (T, u^*, v^*) 的可行点,那么 (\bar{u}, \bar{v}) 必须是小谈判问题 (T, u^*, v^*) 的解。

$$\begin{aligned} \text{公理 5} \quad & \text{如果 } T \text{ 是 } S \text{ 在变换} \\ & u' = a_1 u + b_1 \\ & v' = a_2 v + b_2 \\ & a_1 > 0 \quad a_2 > 0 \end{aligned} \quad (8-19)$$

之下的像集合,那么,我们有

$$\varphi(T, a_1 u^* + b_1, a_2 v^* + b_2) = (a_1 \bar{u} + b_1, a_2 \bar{v} + b_2)$$

这一公理表明:效用尺度更改时,其解不变。

$$\begin{aligned} \text{公理 6} \quad & \text{如果问题 } (S, u^*, v^*) \text{ 满足} \\ & (u, v) \in S \Leftrightarrow (v, u) \in S \\ & u^* = v^* \end{aligned}$$

又有

$$\varphi(S, u^*, v^*) = (\bar{u}, \bar{v})$$

那么,我们有

$$\bar{u} = \bar{v} \quad (8-20)$$

这一公理反映了对称性要求。

以上 6 条公理刻画了谈判“解” φ ,叫做 Nash 公理体系。

2. Nash 定理

假设对于谈判问题 (S, u^*, v^*) ,存在着

$$\begin{aligned} & (u, v) \in S \\ & (u, v) > (u^*, v^*) \end{aligned}$$

又乘积极大问题

$$\begin{aligned} & (u - u^*)(v - v^*) = \max \\ & \text{s.t. } (u, v) \in S \end{aligned}$$

有最优解

$$(\bar{u}, \bar{v})$$

那么点 (\bar{u}, \bar{v}) 惟一存在,而由 (u^*, v^*) 到 (\bar{u}, \bar{v}) 的映射 φ 满足

$$\varphi(s, u^*, v^*) = (\bar{u}, \bar{v}) \quad (8-21)$$

便是惟一满足 Nash 公理体系的映射。

该定理说明了乘积极大化的特殊性,在生态控制决策的实践中,决策者常用乘积极大化来处理竞争各方的矛盾冲突,但在过去一般尚不知道像上述 Nash 定理那样的科学依据充分的那些深刻道理。

3. 用 Nash 谈判问题求解生态建设资金控制分配方案

假设政府有一笔生态建设资金(植树,种草等项目的总投资计 1000 万元),让甲、乙两农场共同使用。并且要求该两农场一定要合理分配,否则不予拨款。于是,在资金使用上两场处于竞争状态。为此想利用 Nash 关于谈判问题的定理求解。

已知甲农场是个大农场,规模大,效益好, x 个货币单位对它的效用值是

$$u = cx, \quad 0 < c \leq 1$$

而乙农场是个小农场,规模小,效益差, x 个货币单位对它的是效用值是

$$v = \ln(200 + x) - \ln 200$$

现要求的是:双方经过谈判之后,所得的 Nash 解是多少? 在此例中, $(u^*, v^*) = (0, 0)$ 。

现令甲农场分得 y , 则乙农场分得 $1000 - y$, 于是,我们有:

$$u = cy$$

$$v = \ln \frac{1200 - y}{1000} \quad (0 \leq y \leq 1000)$$

容易验证, (u, v) 取值范围 S 是有界凸闭集。根据 Nash 谈判定理,为了求解,需解极大值问题

$$u \ln \frac{1200 - \frac{u}{c}}{200} = \max$$

$$0 \leq u \leq 1000$$

利用微分法及近似计算,可得

$$u^* = 781.2$$

由此得知,甲农场应分资金额为

$$y^* = \frac{u^*}{c} = 781.2(\text{万元})$$

乙农场应分资金额为

$$1000 - 781.2 = 218.8(\text{万元})$$

三、Nash 均衡与生态经济价控策略

随着生态动力学和生态控制原理学术水平的提高,应用于经济建设与环境优化的技术越来越多。加之,社会公众尤其是生产部门领导者生态意识的加强,生态控制的技术越来越进步。这样就形成了生态控制技术的供需双方。供方即拥有技术和相应设备并愿为各方面服务的常设企事业单位,我们统称为服务方,现在社会上已有或正在筹建的这类单位主要有:农(林、牧、渔)技术推广中心、植物保护公司、土地改良服务公司、飞播造林(种草)公司、人工影响天气办公室等;需方即在必要时须请供方来服务的生产单位和环境建设单位,如农(林、牧、渔)场、公园、自然保护区等,有些涉及全社会公益的,则由政府作为需方的代表,当需方向供方提

出要求,并把自身作为服务对象时,则称之为用户。

当供需双方接触时,就有一个谈判问题,对于一个具体项目、服务方一般总希望用户多给一些报酬;用户则总希望省一些钱。双方在价格问题上,很难一次性地达成协议,这就需要谈判。只有当服务方和用户在改善生态环境方面,从这一共同目标出发,价格合理,达成协议,才能使服务方得以生存,用户收到效益。为取得这样合理的结果,就需要管理者拿出合理的价格策略。

1. 方法的选用

在实际情形下,服务方和用户都不是唯一的。一个服务方,可以有多个用户。一个用户也可以找到多个服务方。比如说,飞播造林,一个林场想搞这项建设,它可以同多家公司联系,一个公司也可为多家林场服务。

现假设有一个小林场想搞建设,拟求找某造林公司实施飞播。现依优先权的多服务网络的最优价控策略处理这一问题。

多服务网络系统的目标是以用户可接受的代价来同时满足用户对服务质量的不同要求。网络的经济生存性,而且通过对用户行为的影响在生态控制管理中起着重要作用。Kreps 在 *Game Theory and Economic Modelling* (Clarendon Press, 1990) 一书中讲到用博弈论中的 Nash 均衡方法研究基于优先权的多服务网络系统的价格问题。

有时,用户和服务方,双方可能目标不一致,价格可以作为激励用户采取行动的手段,使用户所表现的行为对网络有益。其实,不仅是 Nash 均衡问题,激励 Stackelberg 方法也可以用来建立用户相互之间以及用户方、服务方之间的模型。

下面要集中研究整个策略,在此策略下,用户表现为整体上得到整个系统的合适结果。

2. 系统模型

考虑 M 个优先级的单个的先入先出队列。简单系统可以是 $M=2$, 上述 Kreps 书中给出一种在优先级系统中用服务方和用户的获益函数之间的价格来寻求均衡的方法。令 N 是给定时间内使用队列的用户数。用户 i 可以选择把它的生态控制利用率 s_{ij} 作为第 j 次利用的优先权, p_j 是所占用的支付价格。用户 i 的所有可能策略组成集合 S_i , 并可写出

$$s_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im})^T$$

令 W_i 是队列中的平衡等待时间, $A_i - B_i W_i^d$, 是 W_i 的非线性函数。

用户剩余函数 $C_i(s)$ 的定义是:由利用生态控制服务用户所获得的效益和为服务公司支付的费用之间的差值:

$$C_i(s) = U_i(q_i) - \sum_{j=1}^M p_j s_{ij} \lambda_i \quad i=1, 2, \dots, N$$

式中, $U_i(q_i)$ 是用户获益函数, q_i 表示用户 i 的服务级别, λ_i 是平均到达速率。

用户将选择服务请求,使剩余函数达到最大。一种合适的总体均衡策略对价格政策的有效性是必要的,如果用户表现为一个整体,使其剩余函数最大化,答案是容易得到的。但在应用的过程中,用户是有自发性的, Nash 均衡是一种恰当的策略组合。对于 Nash 均衡以及相关优化策略的定义, Kreps, Basar 等以及 H_0 等分别给出。这里摘其主要应用部分,概述如下

(1) Nash 均衡

如果

$$C_i(s^*) \geq C_i(s_i, s_{-i}^*), \\ \forall s_i \in S_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (8-22)$$

则称策略组合 s^* 是 Nash 均衡。其中,

$$s_{-1} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_N)。$$

(2) Pareto 优化

如果不存在 $s' \in S$ 满足

$$C_i(s') \geq C_i(\bar{s}), \forall i = 1, 2, \dots, N$$

并且至少有一个 i , 使得

$$C_i(s') > C_i(\bar{s}) \quad (8-23)$$

则称策略组合 \bar{s} 是 Pareto 优化。

(3) 激励 Stackelberg 策略

假设 \bar{s} 是整个系统的一个合适的策略组合, 作为管理者, 服务方可以某种价格决定因素构成主导策略 s_0 , 以 $C_i(s_0(s), s)$ 的方式影响 $C_i(s)$, 使得

$$C_i(s_0(\hat{s}), \hat{s}) \geq C_i(s_0(s_i), \hat{s}_{-1}) \quad (8-24)$$

$$\forall s_i \in s'_i \quad i = 1, 2, \dots, N$$

利用激励策略存在的充要条件, 可以很容易地求出激励 Stackelberg 策略。

(4) 关于管理者的合适策略的定理

当并且仅当

$$\arg \max_{s_0} C_i(s_0(s), s) = \hat{s}$$

$$s_0(\hat{s}) = \hat{s}_0$$

的时候, 策略 s_0 是激励 Stackelberg 策略。当用户作为一个整体时, 对管理者来说 \hat{s}_0 就是一个的合适策略。

3. 一个服务方两个用户的两激励问题

为了克服 Nash 平衡解的不稳定性, 采用激励 Stackelberg 策略。

下面举例说明带有非线性函数的两用户的例子。令 $A_1 = 10, A_2 = 15, B_1 = 10, B_2 = 20, d_1 = d_2 = 2$ 。根据上述理论及有关引论, 优化的价格范围定为

$$0.9 < \Delta p < 1.3$$

总的目标是使一切用户受益。在优化范围内, 找到平衡点 \bar{s} 作为策略 (0, 1), 满足

$$(C_1(0, 1), C_2(0, 1)) = (7.64, 12.64)$$

当 Δp 变化时, 用户的金额组合是变化的。

当 $\Delta p = 1.1$ 时, 用户的金额组合表示为

	$s_2 = 0$	$s_2 = 1$		
$s_1 = 0$	8.13	12.50	7.64	12.64
$s_1 = 1$	7.92	11.53	7.58	11.95

Pareto 优化的 Nash 均衡是 (0, 1), 两个用户都想在均衡中起作用, 没有违反管理者的策略趋势。

如果 $\Delta p < 0.9$, 即 Δp 超出优化范围, 例如 $\Delta p = 0.7$, 用户的金额组成是

	$s_2 = 0$	$s_2 = 1$		
$s_1 = 0$	8.13	12.50	7.64	12.89
$s_1 = 1$	8.17	11.53	7.83	12.20

已知 $\bar{S} = (1,1)$ 是 Nash 均衡,但由于 $C_i(0,0) > C_i(1,1)$,它不是 Pareto 优化。如果管理者想保持用户 Nash \bar{S} 均衡,则须使用 Stackelberg 策略。在该策略下,用户余额组合如下

	$S_2 = 0$	$S_2 = 1$		
$S_1 = 0$	6.02	10.20	5.53	12.89
$S_1 = 1$	8.17	10.59	7.83	12.20

可以看到, $\bar{S}(1,1)$ 是带 Pareto 优化的 Nash 均衡。

管理者可通过非线性的激励 Stackelberg 策略作为价格策略,由此迫使用户作为一个整体共同使用服务方的资源——生态服务公司的控制能力。

4. 自然资源利用中生态控制的 Nash 博弈

利用自然资源服务于人类生产活动、发展经济,本来是对社会大有益处的好事。但如果开发不当,只顾眼前经济效益而忽略了长远的生态后果,势必导致生态环境的破坏,受到自然的惩罚、最终损失了长远的经济效益,甚至出现恶性循环。毁林开荒,过度采伐,过度放牧,过度捕捞,总而言之,在利用自然资源的实践中,不注重甚至根本未考虑生态控制问题,给人类社会造成的遗患,古今中外,数不胜数。

吸取了历史上的教训,人们开始重视自然资源开发利用中的生态控制,也取得了一些成果。但是,在没有现代生态控制原理的时代,总是凭经验作定性的控制。而只有利用现代数学方法定量处理,才能得出比较可信的结果。博弈论即是用于这一问题的现代数学中的一种方法。在这里我们以草地放牧博弈为例加以说明。

其实,最迟是从 1739 年开始大卫·休谟(David Hume)等政治经济学者就已经认识到公共资源有倾向于被过度利用的低效率运行,以致浪费资源的倾向。后来的许多研究者更进一步认识到过度利用的生态后果。

设某地有几个放牧户,共同拥有一片可以自由放牧羊群的场所——公共草地。由于这片草地的面积有限,所以只允许不超过一定数量的羊吃饱。这就构成了几个放牧户之间关于养羊数量的一个博弈问题,并且,是一个静态博弈问题。

在此博弈中,博弈方是 n 个放牧户,其各自的策略空间就是各自能够选择的养羊数目 q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的取值范围;当各放牧户所养的羊的数目分别为 q_1, q_2, \dots, q_n 时,每只羊的产出应是羊只总数 Q 的减函数 V ,并有

$$V = V(Q) = V(q_1 + q_2 + \dots + q_n)$$

假设购买和照料每只羊的成本,对每个放牧户来说,都是不变常数 c ,那么放牧户 i 养 q_i 只羊的得益函数为

$$u_i = q_i V(Q) - q_i c = q_i V(q_1 + q_2 + \dots + q_n) - q_i c$$

设 $n = 3$,即总共只有 3 个放牧户,每只羊的产出函数

$$V = 100 - Q = 100 - (q_1 + q_2 + q_3)$$

而成本 $c = 4$ 。这种情况下,这 3 个放牧户的得益函数就分别是

$$u_1 = q_1 [100 - (q_1 + q_2 + q_3)] - 4q_1 \tag{8-25}$$

$$u_2 = q_2 [100 - (q_1 + q_2 + q_3)] - 4q_2 \tag{8-26}$$

$$u_3 = q_3 [100 - (q_1 + q_2 + q_3)] - 4q_3 \tag{8-27}$$

由于羊的数量不是持续可分的,因此上述函数实际上不是连续函数,但在这里可以近似地将其看作连续函数。

下面,让我们求 3 个放牧户针对其他放牧户所采用的策略(养羊数量)的响应函数得

$$q_1 = R_1(q_2, q_3) = 48 - \frac{1}{2}q_2 - \frac{1}{2}q_3 \quad (8-28)$$

$$q_2 = R_2(q_1, q_3) = 48 - \frac{1}{2}q_1 - \frac{1}{2}q_3 \quad (8-29)$$

$$q_3 = R_3(q_1, q_2) = 48 - \frac{1}{2}q_1 - \frac{1}{2}q_2 \quad (8-30)$$

三个响应函数的交点(q_1^*, q_2^*, q_3^*)即为 Nash 均衡。将 q_1^*, q_2^*, q_3^* 代入方程式(8-28), (8-29)和(8-30),得

$$q_1^* = 48 - \frac{1}{2}q_2^* - \frac{1}{2}q_3^* \quad (8-31)$$

$$q_2^* = 48 - \frac{1}{2}q_1^* - \frac{1}{2}q_3^* \quad (8-32)$$

$$q_3^* = 48 - \frac{1}{2}q_1^* - \frac{1}{2}q_2^* \quad (8-33)$$

将式(8-31)代入式(8-32),得

$$\begin{aligned} q_2^* &= 48 - \frac{1}{2} \times (48 - \frac{1}{2}q_2^* - \frac{1}{2}q_3^*) - \frac{1}{2}q_3^* \\ q_2^* &= 48 - 24 + \frac{1}{4}q_2^* + \frac{1}{4}q_3^* - \frac{1}{2}q_3^* \\ \frac{3}{4}q_3^* + \frac{1}{4}q_3^* &= 24 \quad q_2^* + 3q_3^* = 96 \end{aligned} \quad (8-34)$$

将式(8-31)代入式(8-33),则有

$$\begin{aligned} q_3^* &= 48 - \frac{1}{2} \times (48 - \frac{1}{2}q_2^* - \frac{1}{2}q_3^*) - \frac{1}{2}q_2^* \\ q_3^* &= 48 - 24 + \frac{1}{4}q_2^* + \frac{1}{4}q_3^* - \frac{1}{2}q_2^* \\ \frac{3}{4}q_3^* + \frac{1}{4}q_2^* &= 24 \quad q_2^* + 3q_3^* = 96 \end{aligned} \quad (8-35)$$

由式(8-35), $q_2^* = 96 - 3q_3^*$, 代入式(8-34), 则

$$\begin{aligned} 3 \times (96 - 3q_3^*) + q_3^* &= 96 \\ 3 \times 96 - 3 \times 3q_3^* + q_3^* &= 96 \\ 8q_3^* &= 2 \times 96 \\ q_3^* &= 24 \end{aligned}$$

同样代入,得

$$q_2^* = q_1^* = 24$$

将 $q_1^* = q_2^* = q_3^* = 24$ 代入得益函数式(8-25)、式(8-26)和式(8-27),得 $u_1^* = u_2^* = u_3^* = 576$ 。此即该 3 个放牧户独立地同时决定在公共草地放羊数量时所能得到的利益。

为对草地利用效率作出评价,让我们讨论规划利益最大的羊只最优数量。

设草地上羊只总数为 Q , 则总得益 u 可用下式表达:

$$\begin{aligned} u &= Q(100 - Q) - 4Q \\ u &= 96Q - Q^2 \end{aligned} \quad (8-36)$$

使总得益 u 最大的羊只数 Q^* 必使得益函数 u^* 的导数为零,即

$$\begin{aligned}\frac{du^*}{dQ^*} &= \frac{d}{dQ^*}(96Q^* - Q^{*2}) \\ 96 - 2Q^* &= 0\end{aligned}\quad (8-37)$$

解方程(8-37)得 $Q^* = 48$,将其代入总得益函数,得 $u^* = 96 \times 48 - 48^2 = 2304$ 。该结果比 3 个放牧户各自独立决定自己养羊数量时(3 个放牧户得益总和 1728)大得多。而此时的养羊数目 $Q^* = 48$,却比 3 户独立决策的养羊总数 $3 \times 24 = 72$ 少。

综上所述可见,由 3 个放牧户各自独立决策,实际上使草地处于过度放牧状态,会产生负生态动力效应,浪费了草地资源,而放牧户本身也不能得到最优经济效益。如每户限放 $48 \div 3 = 16$ 只羊,则既能保障羊都能吃饱,保障各户经济效益最优,又能使草地不受过度放牧之“苦”,牧草茁壮,草业兴旺,生态环境优越,可保障持续发展。这是得益于以 Nash 均衡指导生态控制优化的一例,其他类似问题,也可有针对性地运用之。

以往缺少必要的定量方法,人们虽然从主观愿望上注意防止不合理利用草地资源等方面的问题,但力不从心,使人与自然在某些方面的博弈失利。

参 考 文 献

- 王英明. 1998. 应用离差最大化方法进行多指标决策与排序. 系统工程与电子技术, 20: 24~26.
- 林定夷. 1998. 系统工程概论. 广州: 中山大学出版社.
- 胡奇英等. 2000. 马尔可夫决策过程引论. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- 徐泽水. 2002. 求解不确定型多属性决策问题的一种新方法. 系统工程学报, 17: 177~181.
- 侯定丕. 1993. 管理科学定量分析引论. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 张嗣瀛. 2001. 控制与决策学术年会论文集. 沈阳: 东北大学出版社.
- 裴铁璠等. 2001. 生态动力学. 北京: 科学出版社.
- 董泽清. 1981. 马尔可夫决策规划. 北京: 中国科学院数学研究所印(内部资料).
- 谢识予. 2002. 经济博弈论. 上海: 复旦大学出版社.
- Aggarwal, R. et al. 2001. Access to natural resources and the fertility decision of women: the case of South Africa. *Environment and Development Economics*, 6: 209~236.
- Basat, J. et al. 1982. *Dynamic Non Cooperative Game Theory*. New York: Academic Press.
- Ho, Y. C. et al. 1982. A Control-theoretic view on incentive. *Automation*, 18: 167~179.
- Merton, R. C. 1998. Applications of option-pricing theory: twenty-five latter. *The American Economic Review*, 88: 323~349.
- Strauss, J. and Thomas, D. 1995. "Human resources: empirical modeling of household and family decisions", in J. Behman and T. N. Srinivasan (eds.). *Handbook of Development Economics*, Vol. IIIA. Amsterdam: Elsevier Science.
- United Nations. 1983. *Relationship Between Fertility and Education: A Comparative Analysis of World Fertility Data for Developing Countries*. New York: United Nations.
- White, D. J. 1993. A Survey of applications of Markov decision processes. *J. Ope. Res. Soc.*, 44: 1073~1096.

第九章 生态智能控制

在这一章,将在论述传统生态控制与智能生态控制关系的基础上,具体论述生态理论与实践中的智能控制的主要方法。

第一节 传统生态控制与智能生态控制

我们之所以单列一章来论述生态智能控制这一问题,是从传统控制与智能控制关系出发的。如所周知,传统生态控制是经典生态控制和现代生态控制理论的简称,其主要特征是基于生态模型的控制。现有生态模型很多,估计直到 20 世纪末,大约在 4000 个以上(参见《生态动力学》第 108 页)。如此多的生态模型以及人们正在继续研究着的模型,是否能满足生态控制研究与实践的要求呢?我们在这里肯定地回答:不能。这是由于随着生产技术和人们对控制目标要求的提高,人们必须面对的受控生态对象越来越复杂,其复杂性表现为高度非线性,表现出高噪声干扰、动态突变性、混沌性等特征。比如,以大尺度生态问题——气候变化对全球生态变化、可持续发展的影响这一社会各界普遍关注的焦点问题,尽管近 20 年来,发表的论著连篇累牍,但鉴于上述特征作用,其复杂性令人迷惑不解;对于微观尺度生态问题,如人工设施内栽培、养殖生物的生态控制,也少有能满足传统生态控制的模式。许多生态复杂性问题,大都难以用精确的生态数学模型(微分方程或差分方程)加以描述。除复杂性外,生态问题的不确定性往往比纯物理运动和工程中要多,而这样的不确定性也难以用精确数学方法来描述。但事实上,随着工农业生产的发展,人类征服自然能力增强,以及人民生活水平的提高,生态控制涉及的内容越来越多,对改善生态环境、避开生态逆境的技术要求越来越高。在如此复杂的生态控制对象面前,把人工智能方法引进生态控制系统,并尽可能地把生态控制理论分析和生态专家的洞察力与人工智能的灵活框架结合起来,对生态控制原理与实践,则有可能获得新的认识与突破,解决具体生态控制问题,为农林牧渔生产决策,为人类卫生环境增优的具体调控措施,提供必要的依据。

智能控制近五六年来获得了长足进展,在众多新学科和新技术推动下,汲取多学科营养。相信,在生态领域中应用,会取得令人满意的效果。图 9-1 是我们依据智能控制现状及生态可能控制问题,给出的生态控制成果预示图。估计,它对生态智能控制的发展目标及其具体措施,会有积极的参考意义。

第二节 生态信息控制中的模式识别技术:通论

关于模式识别(pattern recognition)在生态动力学方面尤其是在农业生态动力方面的应用,《生态动力学》(参见第十二章第十节)已有论述。其实,模式识别在生态学中的应用,主要是在生态智能控制方面。控制及信息是密不可分的。在生态控制中,如本书第三章所述,可以供研究者利用的信息以及历史资料,是异常丰富的。这不仅包括以文字

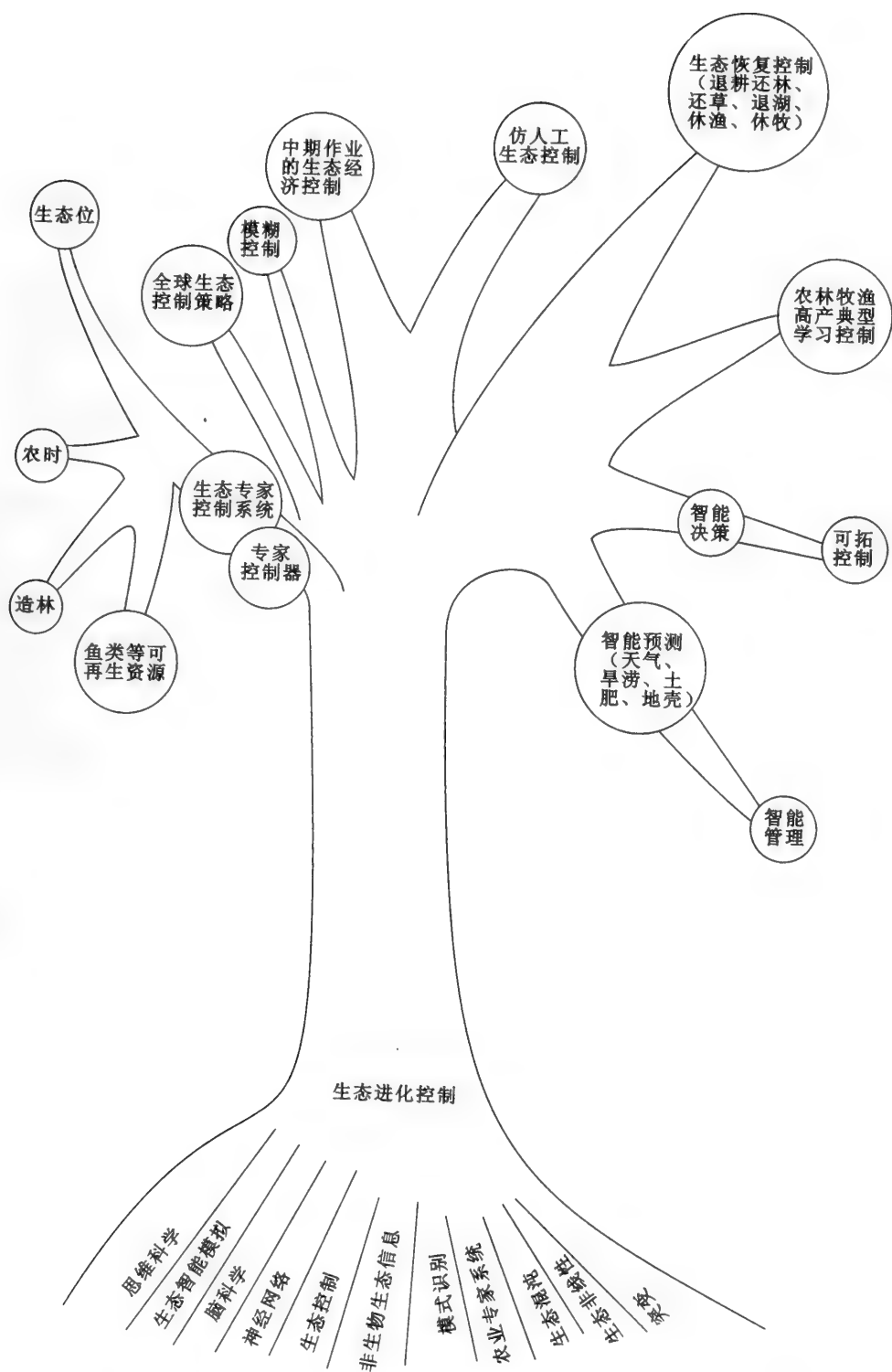


图 9-1 生态智能控制成果基础及预示

记载的资料,以数据记录的仪器观测结果,而且包括用现代的雷达、飞机、卫星、无线电、遥感技术探测得到的数字、图表、图形和图像信息。不仅有能够反映全球生态系统的宏

观信息,也有用电子显微镜观察并用机器加工的细胞等微观信息。这些信息通过各种现行传输手段,可以很快传播于全球。生态工作者希冀能够充分利用这些信息指示生态动力源、汇变化规律,找出可供优化生态控制及时应用的方法,服务于生态学研究及生态建设。

然而,在没有利用模式识别技术之前,尽管那么多资料甚至是经过几十年积累加工出来的,如《历史天气图》《水文资料图表汇编》《中国动植物物候观测年报》《中国土壤志》《中国植被图》等,藏于档案馆、图书馆,有的甚至开架几十年,如1965年出版的《中国动植物物候观测年报》第1号,至今无人问津。为什么会出现这种情况呢?其原因有二:一是学科之间“领域不犯”这种画地为牢的思想方法作怪,以致研究者,比如搞农作物栽培的,对与自身学科相近的知识不感兴趣,对于像物候记录这些与农时控制密不可分的资料,视而不见,听而不闻。二是,没有把大量的与生态控制密切相关的资料用现代技术科学手段加以整理。一提到计算机应用,往往只想到存储与计算,对于其智能控制功能,则很少与自身从事的农、医等生物学领域之实践联系起来。

应感谢数学、语言和技术科学方面工作者,他们在模式识别方面取得成功,为生态控制工作者提供了有用技术,其中伴随计算机发展而兴起的模式识别技术是用于生态信息控制的适应技术之一。随着生态研究者对信息控制的注意,随着模式识别发展,在生态控制领域运用模式识别技术这一课题引起生态学家的重视,并大约于20世纪70年代末至80年代初,从原理上作了一些研究,利用当时有限的计算机条件,1987年11月在美国亚特兰大科学计算和自动化国际会议上和1988年1月在中国《科学通报》和1991年在《农林气象学》国际杂志上发表了模式识别在作物气候生态方面应用的论文,是这方面的尝试。尽管这些方法在我国迄今尚未大范围推广应用,但随着生产发展和网络普及,在生产中发挥作用则指日可待。

一、模式识别在生态控制中的几个主要应用领域

关于生态学中可用的模式识别技巧,如直接模板匹配、统计决策、模糊控制、句法即语言结构法、属性文法方法等,在《霜期农业气候学》(气象出版社,1999)《生态动力学》(科学出版社,2001)中已有介绍,这里从识别对象出发,简介几个应用领域。

1. 对波形和信号的处理

从第三章所述内容可以看出,许多生态信息,尤其是生态动力源、汇的时间序列,很多可以用波形曲线表示出来。这种波形基本上是一维信号,似乎自然适合于句法方法的应用。一个波形可由波形段的连接来表示。但基元(基本波形段)和子模式的选择,从不同的应用角度来看差异较大。经过函数逼近,用直线段和二次曲线段作为波形的基元。这种波形处理方法用于诸如一年生植物的生态产量的逐年连续变化曲线,也可用于表示哺乳纲动物一生中生态体重增量曲线波形等。

2. 对遥感信息的处理

第三章已阐明遥感信息在生态控制中的信息基础作用,但对这些信息,如果只用往常的定性解译方法,则很难找出反映生态信息的某些细微和本质特征,所以宜用模式识别技术给予分析、加工。如所周知,遥感技术是通过对于相当距离的物理对象的测量结果进行分析,从而确定这些对象特性。遥感中的一个重要课题是对地球表面在不同情形下取得的测量结果进行分类与标志。例如,借助于某种光谱测量,我们可以对某一特征地

区种植的各种作物进行分类,或者从光谱的这些测量结果中分辨出一个地区的一种或几种土壤类型、水文类型和气象类型。于是可以从几种遥感地图的迭加上,初步识别几种生态动力源综合地或单独地对作物这类生态动力汇的作用。由于土壤、气象中的气候变化较小,所以它们对作物的影响,年际变化也小;但气象中的天气,水文中的流量等各年差异较大,甚至有突变(比如洪灾、台风),所反映的即时信息,有时常为警报性信息,对人工生态动力源控制作物生态,意义重大。此时当易显示第三章所论许多器测信息的重要性。从长期看来,遥感对作物的分辨,对于及时了解全球生态,以致调节宏观生态、保护人类生存环境,是重要的。在几十年遥感技术发展条件下,至目前,对于那些有特定目标的生态数据信息的分析问题,可以被看作模型识别的一般问题。各种模式识别方法对于遥感图像的识别来说,原则上都是可用的。目前,似以属性文法(attributed grammar)更为合适。

区域分类的基本数学方法大概可以叙述如下:假定一个农业区,有某种大量确定性的产物属于“ ω_i ”类,则人们自然可以认为这一整个区域作为一个整体是属于“ ω_i ”类。基于上述的一类观察,可以形成一种模式分类方法:令 F_1, F_2, \dots, F_m 分别是模式类 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ 中的特征向量的概率分布。于是,给定一个点集(即模式集) $\{X_1, X_2, \dots, X_n\} = \{X\}$, 这些模式都取自同一区域。问题在于要确定哪个分布 F_i 是与它们相联系的。现设一个距离度量 $d(F_i, F_j)$ 是两个分布 F_i 与 F_j 之间的一个合适的分离型度量,并设这个度量将被用来作为判决规则。假定已知 $G(X)$ 是 $\{X\}$ 的分布,我们要比较 $\{d(G, F_i)\}$ 中数的大小,那个使距离 $d(G, F_i)$ 为最小的 F_i 将作为代替 $G(X)$ 的分布,于是向量集 $\{X\}$ 即被确定为已知的类别之一。

设 $F_i(X)$ 与 $F_j(X)$ 分别是模式类 ω_i 与 ω_j 的分布,于是 F_i 与 F_j 之间的距离被规定如下:

$$d^2(F_i, F_j) = \int_{\Omega X} (\sqrt{p(x/\omega_i)} - \sqrt{p(x/\omega_j)})^2 dx \quad (9-1)$$

[式中, $d(F_i, F_j)$ 是 F_i 与 F_j 之间的 Matusita 距离]。如果定义

$$\rho(F_i, F_j) = \int_{\Omega X} \sqrt{p(x/\omega_i)} \cdot \sqrt{p(x/\omega_j)} dx \quad (9-2)$$

则有

$$d^2(F_i, F_j) = 2 - 2\rho(F_i, F_j) \quad (9-3)$$

量 $\rho(F_i, F_j)$ 表示分布 F_i 与 F_j 之间的相关函数,我们可以用它来作判决,因为要使 $d(F_i, F_j)$ 极小,等于要使 $\rho(F_i, F_j)$ 极大。从而可以进行如下的判决分类:选定这个类别的相关函数 ρ 取得最大值。

在方程(9-1)中的定义,对于任何一对分布都是适用的。现在,让我们转到特殊的情形——分布为多元正态分布的情形。假定 F_i 与 F_j 是 N 维正态分布,分别具有均值向量 M_i, M_j 和协方差矩阵 K_i, K_j 。这样一来,

$$\rho(F_i, F_j) = \frac{|K_i^{-1}K_j^{-1}|^{1/4}}{\left[\frac{1}{2}(K_i^{-1} + K_j^{-1})\right]^{1/2}} \exp \left[\frac{1}{4}(K_i^{-1} + K_j^{-1})^{-1}(K_i^{-1}M_i + K_j^{-1}M_j) - \frac{1}{4}(M_i^T K_i^{-1} M_i + M_j^T K_j^{-1} M_j) \right] \quad (9-4)$$

当 $K_i = K_j = K$ 时,

$$\rho(F_i, F_j) = \exp \left[-\frac{1}{8} (M_i - M_j)^T K^{-1} (M_i - M_j) \right]$$

当 $M_i = M_j = M$ 时,

$$\rho(F_i, F_j) = \frac{|K_i^{-1} K_j^{-1}|^{1/4}}{\left| \frac{1}{2} (K_i^{-1} + K_j^{-1}) \right|^{1/2}} \quad (9-5)$$

利用基本数学公式,对遥感资料识别,早期用于飞机遥感。早期的工作可追溯到 1966 年 Мотовилов 的工作。那时在复杂的农业景物中,已可初步识别发芽、成熟。用于作物分区调查,用遥感探测物候变化。在 20 世纪 60 年代,曾利用 12 个特征量度构成的 12 维特征向量,对作物和地面植被进行分类。当时即可用飞机遥感资料分出大豆、玉米、草原、残株、三叶草、燕麦、裸地等。在 1972 年以来有了 Landsat 资料分类方法。

3. 对微观生物信息和微环境数据的识别及其应用

我们在第三章讲述的用计算机视觉技术处理过的生物图像信息,是经由模式识别处理的一种有用信息,对生态控制来说,有着特殊意义的基础作用,但这样一些微观生物信息本身尚不能构成生态控制的直接结果。为使其在生态控制中真正起到应有的作用,还要对与其有关的一些生态动力源要素(重点是关系重要的变动性生态动力源要素)进行模式识别。这就是说,在对生物微观信息进行识别的同时,对生物所在环境的信息也进行识别,我们把这种识别叫做生态动力源和汇的平行模式识别,也可叫做并行模式识别(parallel pattern recognition)。

首先,我们对育苗温室内培育的种苗的生长发育状况进行并行识别。利用图像细化处理技术来识别黄瓜苗的长势、颜色,用高倍显微镜拍摄下不同微环境下的黄瓜苗的细胞切片照片,再用计算机图像处理设备进行识别,放大增晰,这就是作为我们所要识别的生态动力汇的微观模式,利用句法模式识别和属性文法方法,用 Chamsky 规则(参见《生态动力学》第十一章)编成码,表示识别对象与其平均状况的差异及其随时间的随机变化规律。由于存在许多干扰,一般自动打出曲线(类似于医学上的心电图)。与此同时,利用现在已有的各种有效的仪器自动测定作为土壤、气象、水文生态因子类别的生态动力要素,主要包括土壤质地、土壤温度、土壤水分状况、土壤中 N, P, K, Ca, Mg 及各种微量元素动态;种苗生长环境中的空气温度、湿度、微风状况和用光合作用分析仪测定 CO_2 浓度、光合作用效率等。由于在育苗温室内,除黄瓜苗外,一般没有其他生物(假定没有病虫害)作为黄瓜苗的环境,所以在生态动力源中,可不包括生物性质的生态动力源在内。但为防病虫害干扰,也可将致病微生物的识别和虫卵等虫源识别包括在生态动力源的内容之中,此时像真菌识别、土壤中虫卵识别等也是生态动力源识别,因为这些对作为生态动力汇的黄瓜来说,也是生态动力源,与前述大多数生态动力源不同的是,它们是生物性质的生态动力源。将生态动力源各要素,也分别绘成曲线。这样就形成了源汇因子各异的曲线族,输入计算机构成波形曲线族,在一定的生物物理指标条件下,用句法模式识别曲线识别方法(详见 *Agricultural & Forest Meteorology* 杂志 1991 年 55 卷及 1987 年 *Proceedings of the International Conference on Scientific Computing and Automation* 中模式识别论文)。利用智能计算机的运行,即可很快找出关系,比如识别出在环境温度超过黄瓜苗所需温度临界值范围达到一定程度时,黄瓜徒长、纤细、颜色发黄,此时正常

的做法是根据这一机理,调节秧苗所在环境的温度,通过通风或其他方法使温度降至所要求的范围,再继续观察苗情动态。这是从机理上可以解释的以模式识别为基础的生态控制措施。对于其他依机理尚不能解释的但符合随机偶然性规律,如符合概率规律者,也可作相应的生态控制。

其次,上述的识别方法,完全可以用于相应的非封闭的农业生态环境。对于非封闭环境,变化中的生态动力源规律尤其是它们的未来变化规律,对于人工生态控制来说,显得特别重要。在生态动力源中,易发生突变的泥石流、滑坡(属地貌类)、洪水、森林火灾、温度、风、降水,其中除气象类外,均属偶然的稀有事件。为了识别随时可能对作为汇的生物作用,在作上述识别的同时,作生物环境的气象条件的识别,从 Rosenberg 所论观点,在气象中“小气候才属生物环境”,小气候是英文 microclimate 的汉译,因为现在中国已通译为“小气候”,其实也可叫微气候,这表明在生态上识别的应是微观环境条件中的微气候。但是由于涉及生物问题,尤其是个体生物的微观问题,大气候总是通过微气候表现出来。所以要想知道未来几天(一般可取 5d)的微气象条件,当须考虑未来 5d 的大范围天气预报。这在中期天气预报准确率很低的时代,是不必考虑的,但近一二十年,由于数值天气预报进展快并已业务化,使其在农田生态控制中可以发挥特有的作用。按目前进展,大多数栽培者尚不能直接利用数值天气预报 NWP 的模式输出图,故须生态动力工作者将 120h 以内的模式输出图,作为生态动力源按一定格式进行模式识别(罗春田, 1990),这样可结合其他不变与变化的生态动力源(例如在未施肥时,土壤中 N, P, K 可认为 5a 不变;若计划未来 5d 内,比如玉米按大喇叭口前期施肥,为变化的土壤营养生态动力源)利用物候动力法(详见《生态动力学》第十章、《大自然的语言》第 117 页)制作出比较客观的生态预报。按照过去人们一般的想法,有了生态预报这样的科学基础,特别是有了提前 3~5d 的微观生物与环境两方面关系的预报,人们就可依所要达到的目标实行促控措施了,当然,这是很好的生态控制措施。但按目前科学发展的水平来衡量,这还没有达到理想的境界。因为到这一步,尚未达到最优化的目标。而那种视预报为绝对科学,按预报直接采取措施的做法,并不是客观的做法。如所周知,任何生态动力预报都不可能完全准确,如何运用预报作决策,其科学水平和技艺高度,并不亚于预报制作本身。而预报者常说的“管报管用”的真正实现,只有在预报者和实用设计者共同研制出一整套的决策手段后,才能真正起到生态控制最优化的作用。现有的优化控制方法很多,在本书一些章节中有论述,比如说运筹学的决策论,以 Марков 决策规划为例,可以把行动措施 d 分为几种。对于作物生育期的低温霜冻灾害,可有:未来 5d 内, $d=0$ (不采取人工水文生态动力源方面的措施), $d=1$ (少量灌水,采用人工水文生态动力源措施,像喷灌), $d=2$ (大量灌水,比如漫灌), $d=3$ (局部熏烟)。这些措施是依据预报状态来确定的。而要完成整套马尔可夫决策(MDP)之有限阶段模型的优化设计,就需要在索取并积累有关的大量资料的基础上,科学地给出转移概率的矩阵。一般说来,达到此步可认为生态控制比较客观化了,但就动态控制的现实意义来说,仍不算最理想。因为涉及到人与未来生态动力源的问题,实际上是在所论领域中,人与自然的博弈。这是因为如果所针对的状态是不变的,是观测现时客观对象,那就是一般决策论的问题了。但预测的状态是变动的,这就是带有对抗性或带有竞争性的决策问题了。此时,应进一步用博弈论处理这样的问题,数学上已有这样的工具和方法,那就是已形成一门数学中运筹学重要分支学科的博弈论,近年 Nash 均衡尤其引人注目。用上了博弈论,可谓使“模式识别→生态预测

→决策→对策”成为一种系统控制方法。

4. 声音模式识别在生态智能控制中的应用

如果翻阅一下自 1965 年至 1988 年先后由科学出版社、测绘出版社出版的 10 种《中国动植物物候观测年报》,不难看出其中植物部分所占篇幅多,而动物部分少。系列年报第二号正文共 290 页,大部分是表格;其中,动物物候只占 4 页。第 10 号共 280 页,动物物候只占 10 页。自竺可桢以来,我国几代物候专家多把自然物候比作大自然的語言,即根据植物和动物的动态来判断大自然向人们提供的一种信息。然而,这些被喻为語言的现象,一般也只是无声的語言,有声語言记录微乎其微。来自动物的大自然的語言,几十年来人们所记下来的更少。比如 1965 年全国记录的布谷鸟始鸣日期的,只有 15 个地方。在过去几十年,受到声音记录条件限制,加之动物叫声是并非连续的,比较正确地记录动物的声音十分困难。而植物不同,比如 5 月 1 日开花,5 月 2 日去观察仍能看到,它有一个持续时间。1986 年在不同地点,以四声杜鹃为对象作野生动物物候观测。在北京,地理所宛敏渭研究员记录下始见日期 6 月 13 日,并记录下来其始鸣日期;在新疆石河子,徐文洪教授和隋云凤教授只记录下来其始鸣日期 5 月 10 日,而未记录下来始见日期。几位观测者都是生物气象专家,记录显然可靠,但难于对比。在北京 6 月 13 日之前有可能杜鹃始鸣,但观测者未听见。另一方面,声音的描述和标准很难掌握。中国科学院地理所物候观测专家刘秀珍,根据竺可桢指示在北京等地搞物候观测 20 多年,风雨无阻。刘秀珍道:布谷鸟“叫声四声一度(kwi - kwi - kwi - kwi - kwok)”;蚱蜢雄性作‘蚱’声长鸣;在我国大部分地区,秋季蟋蟀“鸣叫声如‘哩哩哩哩’四个音节连续发出”;“而在江苏、浙江一带的蟋蟀发出的叫声是‘杵杵洗洗,浆浆折折’”。这对生态学家尤其是生态控制工作者是宝贵的财富。

随着有关科学发展和高新技术进步,为推进《生态动力学》一书中所提倡的发展方向之一的生态学高新技术化的宏伟目标早日实现,应生态控制原理尤其是其中生态智能控制进展需要,提倡用机器记录和识别有声物候资料。关于自然界声音记录和一般的机器语言识别容易理解,下面,略加叙述主要原理。

迄今,已发展 20 多年的语音处理技术主要是人的语音识别,当然用于识别动物声音,也是一个道理。只不过动物发出的是无意识的叫声,为叙述方便,下文仍以语音对待,即把叫声比作一种有声的大自然的語言。声音信号处理技术主要包括:声音识别、声音合成、声音编码和发音者识别。

傅京孙曾指出:语音频谱的数学计算可用 Fourier 变换实现。

设 $x(t)$ 是语音信号, $w(t)$ 是窗口,窗口内的信号是:

$$S(t) = x(t) \cdot w(t) \quad (9-6)$$

用 T 表示采样周期, \hat{S} 表示采样信号,并有

$$\hat{S}(t) = S(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S(nT) \delta(t - nT) \quad (9-7)$$

可以计算出 \hat{S} 的频谱如下:

$$S(K\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} S(nT) \exp(-jnk\Omega T) \quad (9-8)$$

这里 $\Omega = 2\pi/(NT)$ 是频谱分辨率, NT 是窗口长度;方程(9-8)可用快速 Fourier 变换(FFT)来计算。

通过一系列数学推导和滤波迭代等数学处理,可以对各种鸟的叫声进行识别,形成

识别过程的鸟语音素图(图 9-2)。

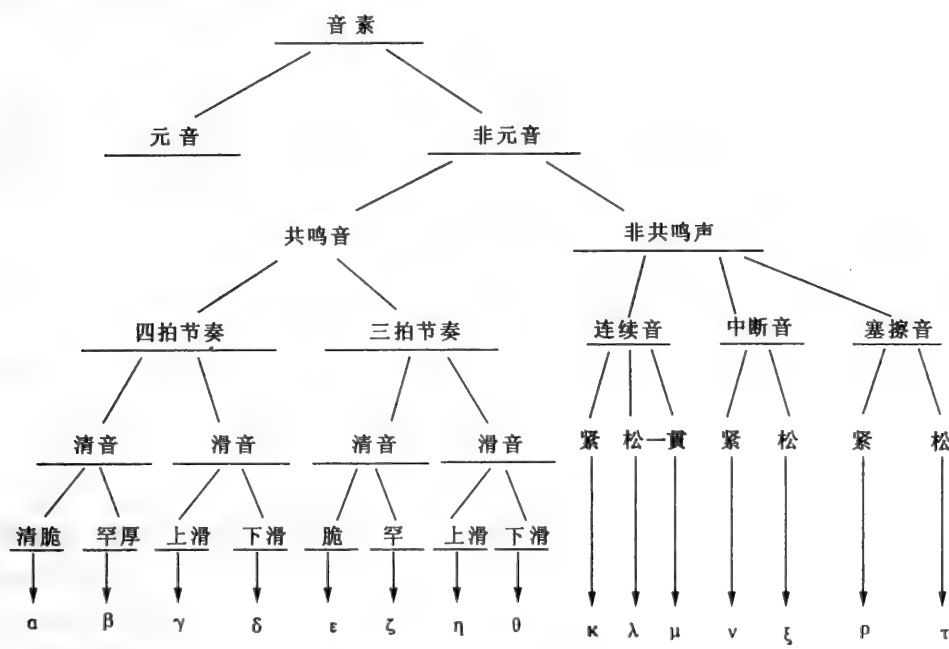


图 9-2 鸟叫声识别
鸟鸣用希腊字母表示

现在,语言识别技术已有了新的发展,它成为多维模式识别和智能计算机接口的范畴。对动物(主要是鸟类),以物候研究为目的的模式识别,实际上是模仿对人的语音识别的技术,研究出一种有听觉功能的机器,这种机器能够接受各种对象的声音,并分辨出不同鸟类的声音。

事实上,让机器“听懂”有声的大自然语言,是作者多年来的夙愿。实现其试验阶段的工作则必须依靠高新技术的发展,将物候观测纳入模式识别机的一项应用领域。为了实现这项技术,物候工作者乃至研究鸟类的专家,必须参与研制。根据最新出版的《中国鸟类野外手册》(约翰·马静能等,2000),中国现有 1300 以上的鸟种,该书中对一些主要鸟种的鸣叫声作了详细注音,如:普通翠鸟,叫声为 tea-cher;普通楼燕,尖声 srrreeee 高叫;凤头树燕,叫声为 cher-tee-too-cher-tee-too-cher-tee-too 等。

语言识别的数学模型近年有许多新进展,如以 Марков 过程为基本原理的隐式马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)由 Марков 链演变而来。又如人工神经网络(ANN)技术的应用等。发音者识别是最终证实鸟属于哪一种的技术基础。发音者与目测相互验证,使测定结果更为准确并具有可比性。如果把采录叫声的设备放入自然保护区、森林公园或其他监测地区,更易监测昼夜动物的叫声,比如猫头鹰是夜叫,而物候观测者不能日夜值班观测,当然特殊情况下,短时间的连续观测例外。目前,发音者识别(speaker recognition)是通过对所接收到的声音信号,从中提取某些特征并建立相应的数学模型,然后进行识别。其主要技术包括发音者特征提取。具体方法目前有:①频谱特征滤波;②针对特定发音者的相同的比较标准声音建立数学模型;③利用人工神经网络,判定发音者。

我们所述,来自自然界动物声音的识别,是以声音模式识别这种高新技术为依托。

生态控制研究者,当然没有必要全面掌握声音模式识别高新技术原理、数学演绎等,但必须正确理解,正确应用,以求发展所从事的生态控制原理。尽管从我国经济技术发展的客观条件看,短时间很难实现这样的自动化目标。但现在对其开始研究,不算为时过晚。而将来,相应的专门硬软件研制出来后,设在森林、草原、湿地等的仪器从千里之外为生态工作者传来布谷鸟报春、百灵鸟叫声、湿地鹤鸣,回忆起欧阳修《醉翁亭记》、孟浩然《春晓》和《诗经·小雅·鹤鸣》中的描述,似成为古代典籍谱曲的美妙动听的交响乐,而这并非以让人们欣赏大自然艺术为宗旨,正是生态控制原理研究之必须。

第三节 生态控制信息模式识别技术实例

在生态控制的许多实践中,应用模式识别技术的场合很多,我们在这节举出一些实例,无论从方法、范围、控制应用来说,都有一定代表性。

一、物候图识别与应用途径

我国物候研究由来已久。自 20 世纪初,随着有关学科发展,现代物候学从创建到发展,进程较快。我国现代物候学的奠基人是竺可桢院士,他早在 1921 年就在南京开始了物候观测工作,继后组织全国性的观测网,并出版了《中国动物植物物候观测年报》等大量资料、图集。20 世纪 60 年代,竺可桢在《年报》第 1 号出版时曾说:“物候观测年代越长,准确性越高,价值越大”。至 20 世纪 80 年代末,由科学出版社等正式出版的物候资料已经很多。未出版藏于档案馆的更多。由中国气象局组织作为农业气象业务的自然物候和主要农作物物候观测,是全国范围的,年限也有几十年。

然而,直到目前为止,物候资料研究和应用,仍非常有限。从应用的范围来说,往往开始只是单点观测单点应用,继后也只是考虑相邻几个站观测结果的关系,加以应用。这就犹如在气象学发展的初级阶段,只是利用本站点或相邻几个站点资料,为本站服务,作单站预报,进行小范围的气候分析,而不能从大范围内各点的相互联系上,把握一个地方的天气、气候与其他有关地方的联系。其实,如所周知,即使要制作东亚某一城市的天气预报,至少也要用东亚天气图,一般用欧亚天气图,甚至用上北半球天气图。只就地面记录而言,所涉及的资料之多,是可想而知的。我国自 20 世纪 60 年代开始出版的一些物候方面的图册,是利用大范围物候记录为农事服务的前奏。但由于信息量少,传输渠道有限,尤其是缺少现代高新技术的应用,以至大约 40 年来,基本上没有新的较好的控制途径。

1. 图形准备

现以 1985 年全国榆树开花始期为例,原始资料引自《中国动植物物候年报》第 10 号(测绘出版社,1989)中 1985 年的数据,参考了中国气象局有关资料订正。由此,我们填图并绘出图 9-3、图 9-4 和图 9-5,作为识别的基本图形。这里,先对三个图特征,作一般分析。为了便于分析,我们将月、日换算成数字代码 d_0 ,如表 9-1 所示。

表 9-1 月、日与数字代码 d_0 对应关系

日期	2 月 1 日	3 月 1 日	4 月 1 日	4 月 11 日	……	4 月 30 日
代码 d_0	1	29	60	70	……	89

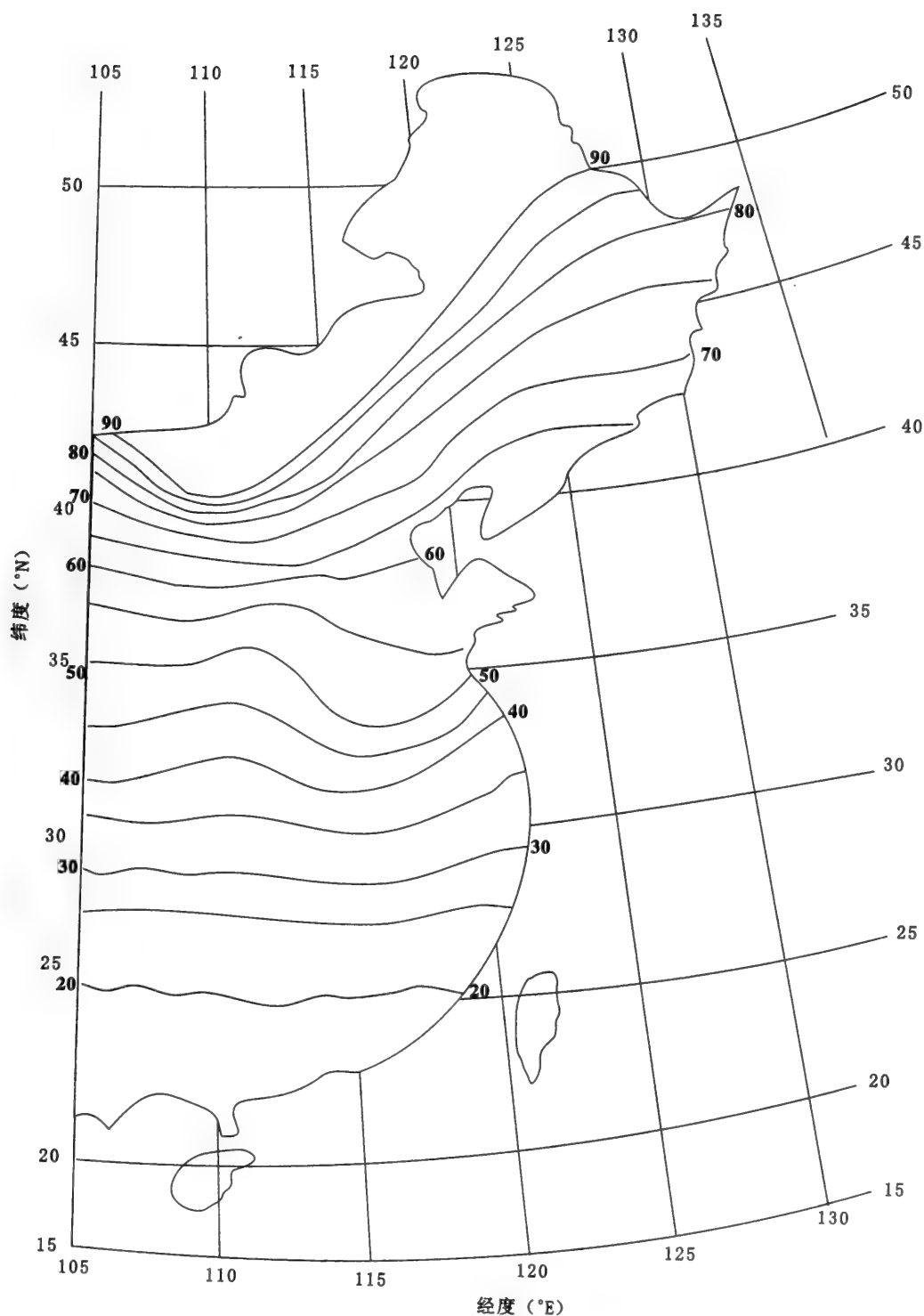


图 9-3 1985 年中国东部榆树始花期物候图(平面位置图)

(1) PPI 图

图 9-3 是中国东部榆树始花期的平面位置显示(Plane Position Indication, 简记 PPI), 该图是每年一幅, 但不是一次绘成, 一般在榆树有可能开花的 2 月初(如果有 25°N

以南的观测点,应更早)注意收集信息,每获取一个物候实测记录,即将其填在底图上。由于始花期一般是自南向北推移的,所以大概一个月之后(大约在3月初), 30°N 以南的记录比较齐全。此时可依有限记录,草绘出等值线,直到 $d_0 \geq 90$,绘出完整的图并进行修改,最后定稿。

(2) RHE 图

图9-4是1985年中国东部物候距离(经度)图(RHE),即从 105°E 向东的离开 105°E 的距离,作为横坐标,以测站海拔高度作为纵坐标,绘成的 range-height 图。绘制该图的目的是显示:从海平面到海拔1000m的各个层次,榆树始花期的迟早与距离海岸远近的关系,以了解同样海拔高度的条件下,距海岸远近对花期迟早的影响,并将其作为后面将要阐述的属性文法(attributed grammar)的一种属性。举例说,大约在海拔40~50m的高度层次上,距海岸越近,始花期就来得越迟,表现在图9-4中,自左向右(即自西向东,自内地向沿海) d_0 值从接近40到60左右;在其他高度层次上,也可作类似观察,从中找出初步认识的一定规律性,这可从气候大陆度给予解释。

(3) RHN 图

图9-5是1985年中国东部物候距离(纬度)高度图(RHN),即从 25°N (因为五岭以南没有记录)向北的纬度离开 25°N 的距离作为横坐标,以测站海拔高度作为纵坐标绘成的 range-height 图。绘制该图的目的是显示:从海平面到海拔1000m的各个层次,榆树始花期的迟早与海拔高度的关系,以了解在同样海拔高度条件下,纬度高低对始花期迟早的影响,并将其作为后面将要阐述的属性文法的另一种属性。举例说,大约在海拔120m以下,纬度越高,始花期来得越迟,图中显示从低纬到高纬, d_0 值从10左右到70;在其他高度层次上,也可作类似观察,从中找出初步认识的一定规律性。这显然可从各纬度温度变化给予解释,因为始花主要取决于作为其生态动力源主因子的温度值。

2. 识别方法和步骤:属性文法的运用

根据模式识别原理,在学习钱学森、宋健、傅京孙、程民德、戴汝为、胡启恒诸院士有关论著,参考边肇祺、王耀生、梁平德等多位专家在不同领域应用模式识别的经验,在我们以往于生态领域运用模式识别的实际经历的基础上,初步认识到,在物候图模式识别中运用属性文法方法作识别,是比较现实的。主要优点是可以避免或减少干扰,取得比较客观的有实用价值的成果。下述其步骤。

(1) 模块和基元区的划分

依物候生态控制研究之需要,将大范围物候期等值线图绘于朗伯托投影的地图底图上,成为图9-6、图9-7和图9-8。在该图中,按地理区域,将中国东部分为10个块,成为模块的基本构件。该地理区域包括9个外基元,在图中用阿拉伯数字1,2,...,9共9个数字标出;分出三个内基元,用罗马数字I,II,III共3个数字标出,按其地理位置,我们分别称之为东北地区、中原地区和东南地区。内外基元加在一起共有12个模块。

(2) 基元选择和分隔符的定义

为了避免噪声,我们只考虑反映二维场中模块内主要特征的形势。信息结构基元分隔符定义如下:

① 斜线型:在一个模块内,基本形势是:有一条(或数条平行)等物候线呈自左下至右上的一条斜线,与经纬线夹角接近 45° (允许 10° 误差),我们用希腊字母 α 表示。

② 下斜上平线型:一条等物候线,下斜与纬线夹角 20° 左右,然后与纬线基本平行,我

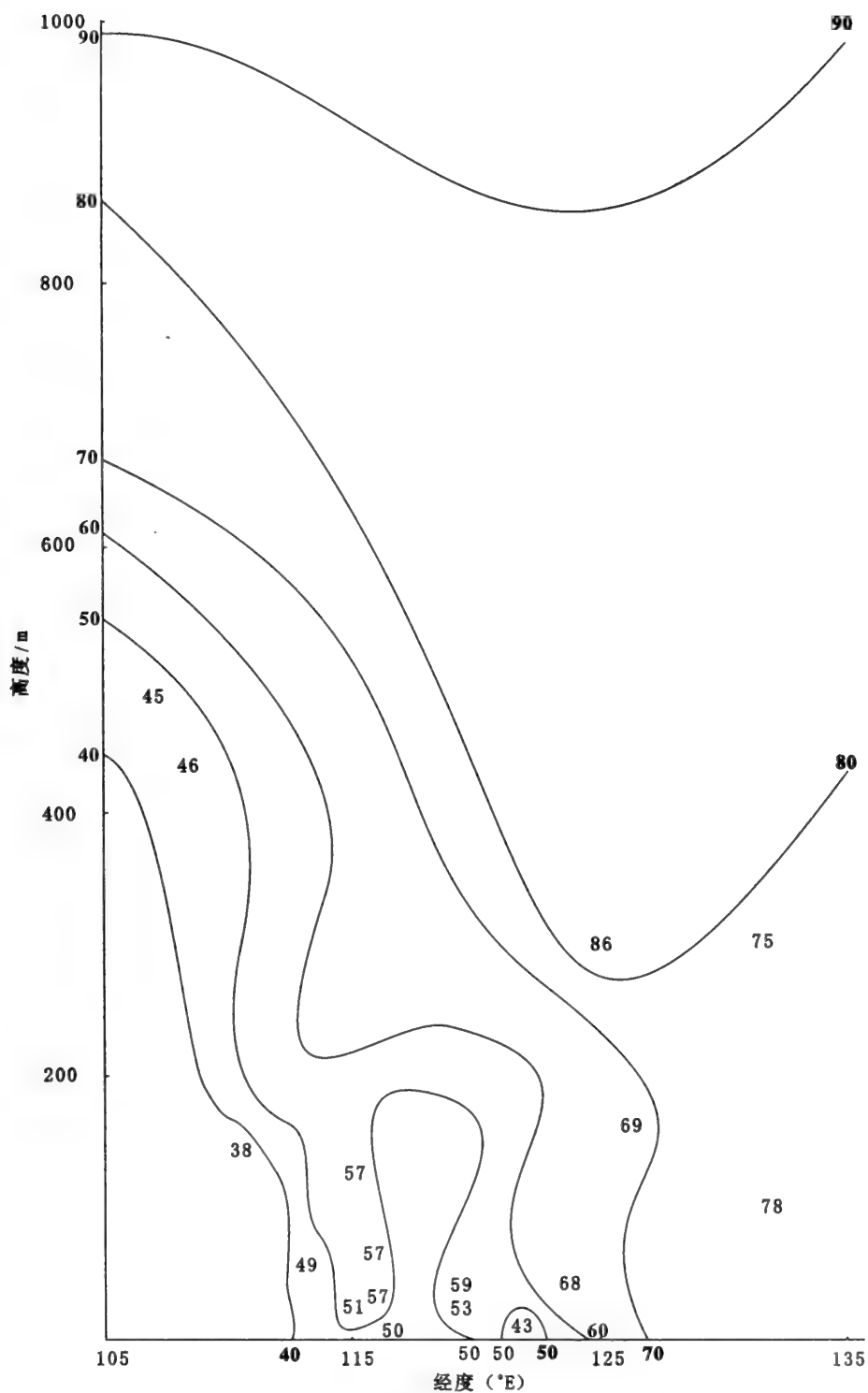


图 9-4 中国东部物候距离(经度)高度图(RHE)

植物名称: 榆树

物候期: 始花期

年份: 1985

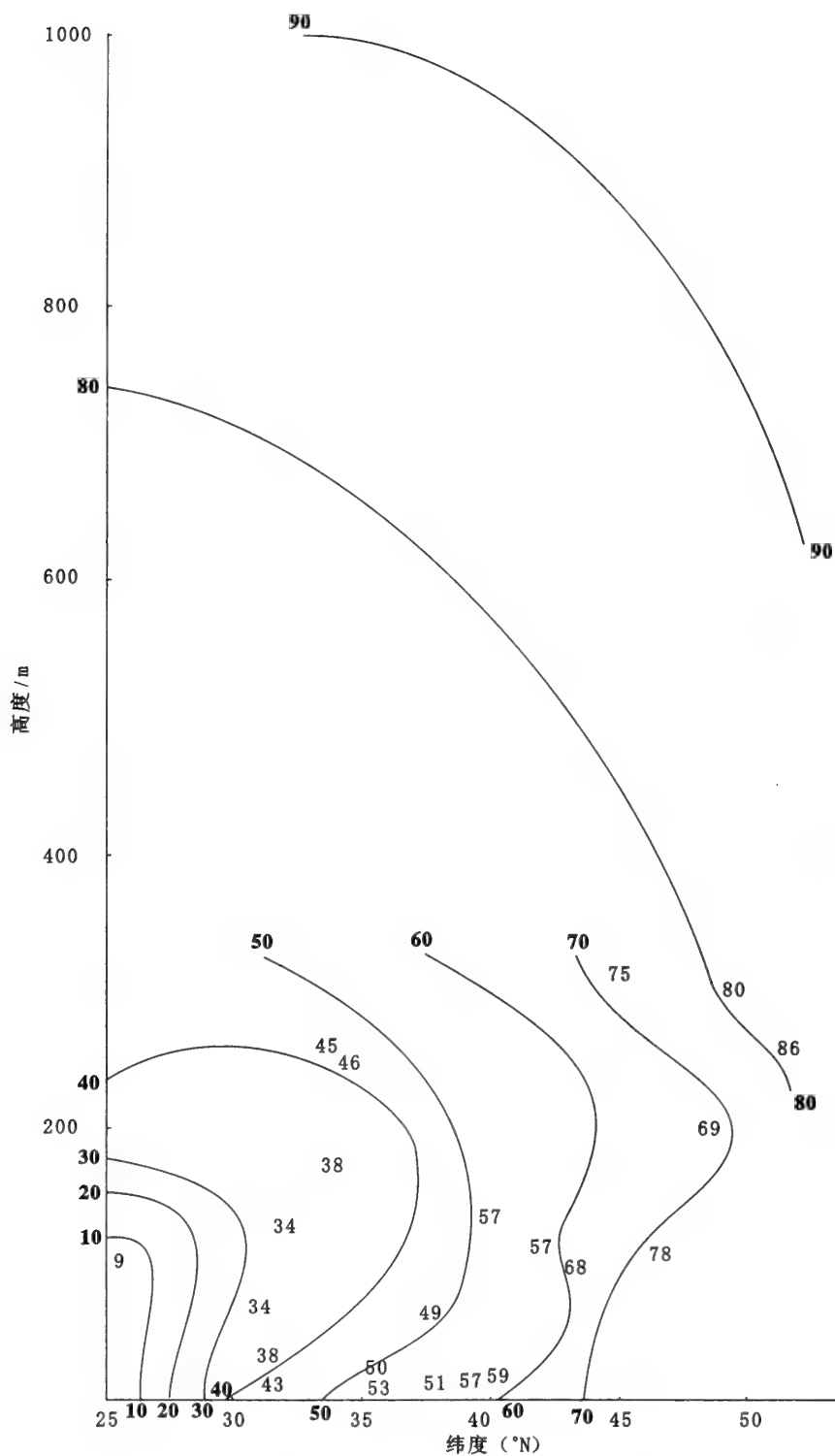


图 9-5 中国东部物候距离(纬度)高度图(RHN)

植物名称:榆树

物候期:始花期

年份:1985

们用希腊字母 β 表示。

③ 上斜下平线型:一条等物候线,上斜与纬线夹角 20° 左右,然后与纬线基本平行,用

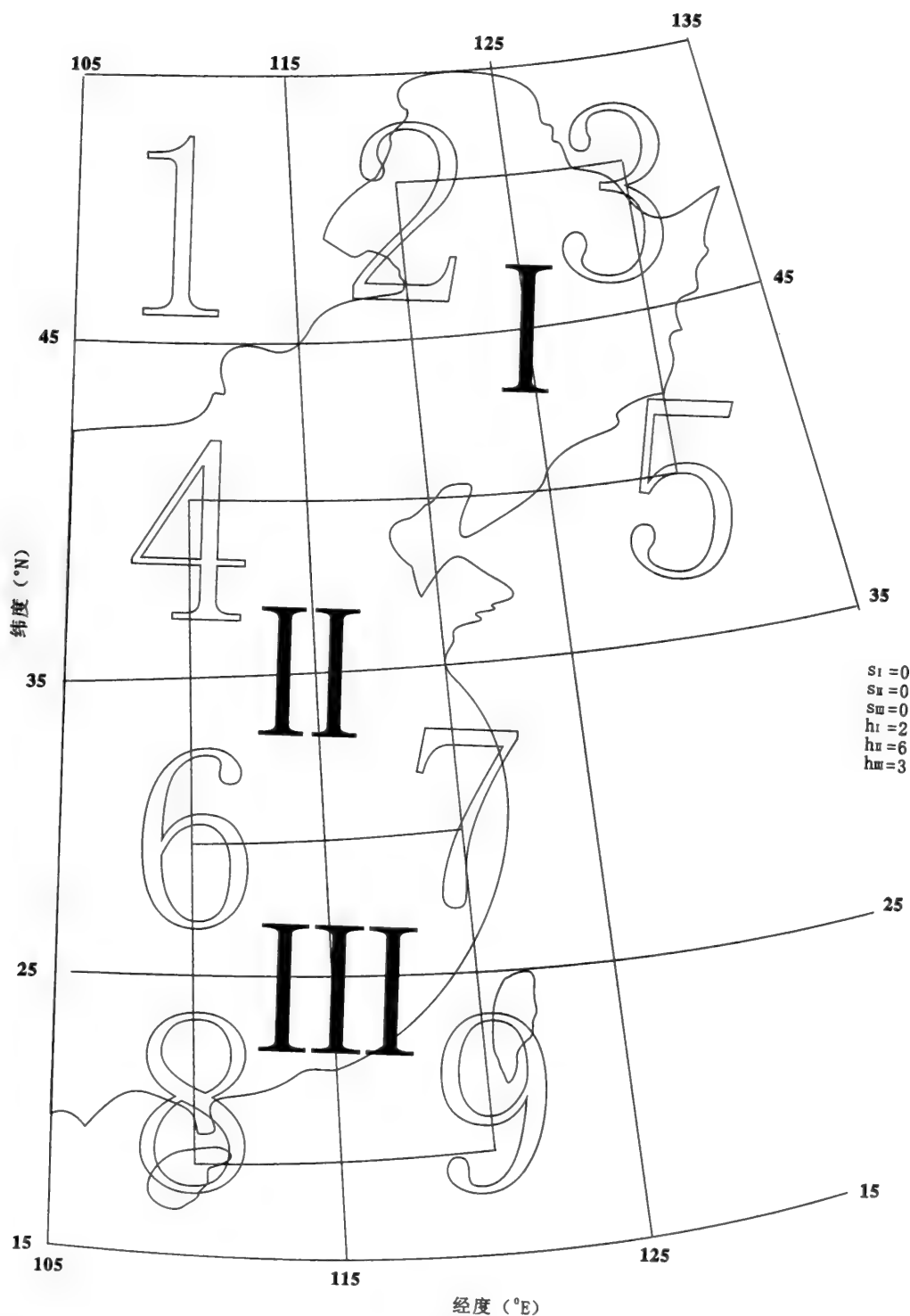


图 9-6 模块及基元区分

希腊字母 ν 表示。

④ 槽或低值型：相当于气象当中的所说的低压槽或低压区的形势，这里当然指的是等物候线，用希腊字母 γ 表示。

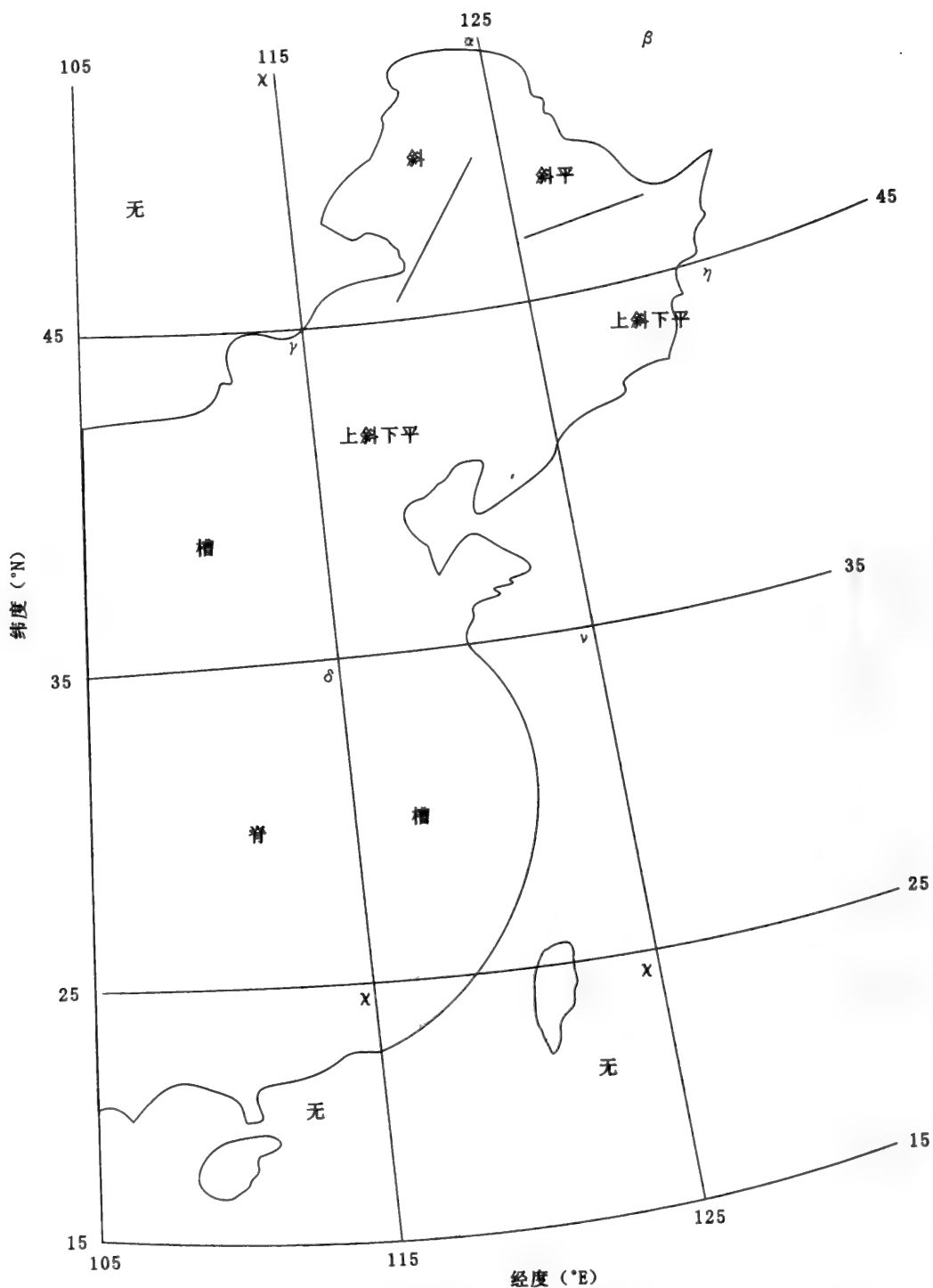


图 9-7 模块特征表达——外基元部分
(两图对照得出,图略)

⑤ 脊或高值区:相当于气象学中所说的高压脊或高压区的形势,这里当然指的是等物候线,用希腊字母 δ 表示。

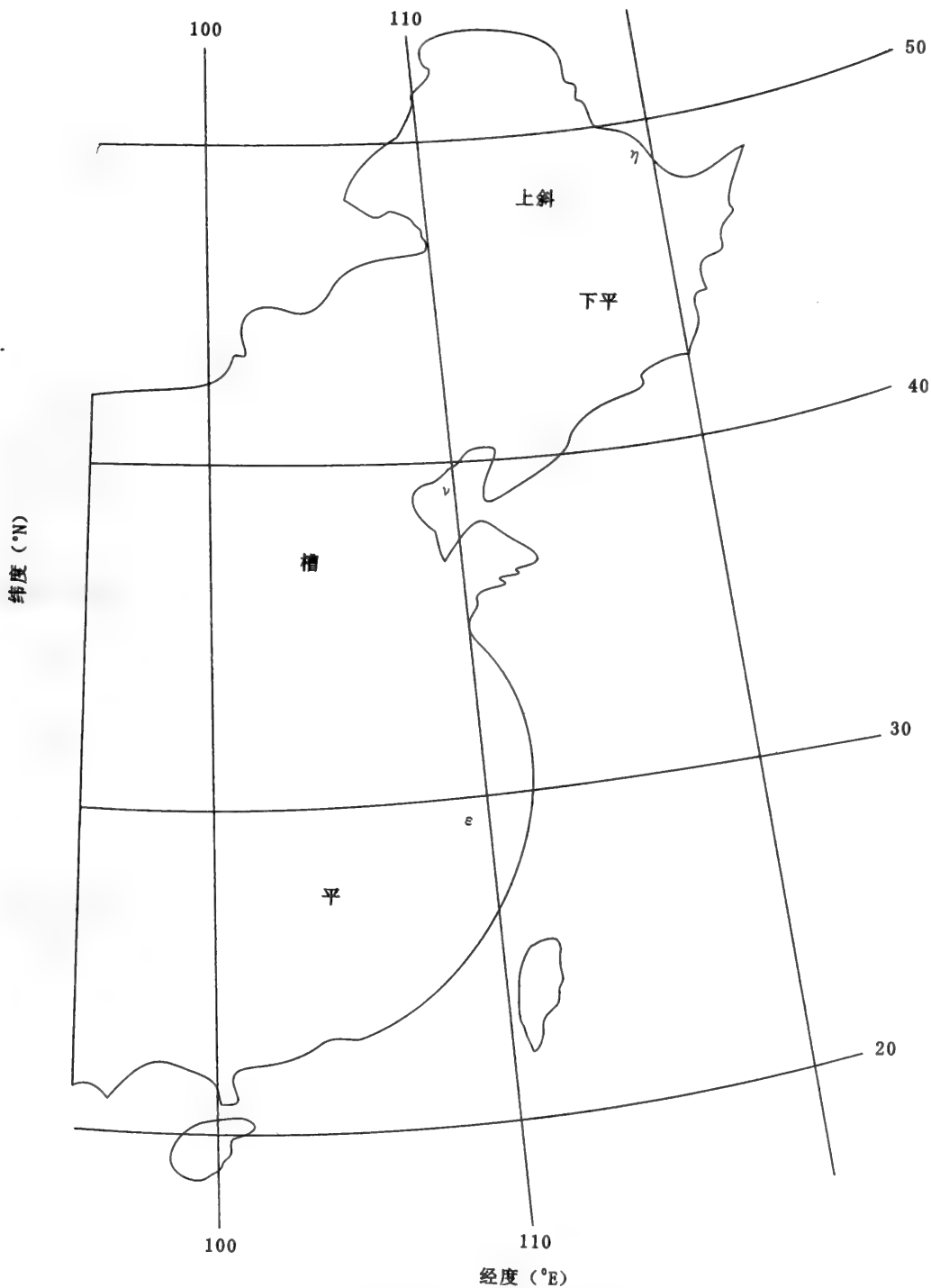


图 9-8 模块特征表达——内基元部分
(两图对照得出, 图略)

- ⑥ 平直线区: 等物候直线大概呈平直线, 即与纬线大体平行, 用希腊文字母 ϵ 表示。
- ⑦ 上斜下平型: 将一个模块分为上、下两个部分, 上部分斜线, 下部分呈平直线, 用希腊字母 η 表示。

⑧ 垂直线型:模块内有与经度线大概平行(误差可在 $\pm 10^\circ$)的线,用希腊字母 τ 表示。

⑨ 鞍型场型:在模块内两脊相对,两槽相对,呈马鞍型,相似于气象学中的鞍形气压场,这里当然指的是等物候线,用希腊字母 ω 表示。

⑩ 无等值通过或其他型:在模块内,没有等值线通过,或不能归入以上9种符号者,用希腊字母 χ 表示。

(3) 属性的引进

这里引进的属性表示:按识别顺序,前后两模块之间的比较。根据物候识别的性质,主要比较海拔高度和距东海岸距离。

为在模块连接方式中引进属性,设 a_i 和 a_{i+1} 为前后相邻的两个基元,则有

$$\text{CAT}(a_i, a_{i+1}) = (h, s) \quad (9-9)$$

式中, h 是 a_{i+1} 所在模块区域的高度等级 $T(a_{i+1})$ (指绘图应用其观测数据的测站的高度等级,以100m为单位, $<100\text{m}$ 为0, $[100, 200)$ 为1,依此类推,下同)减去 a_i 所在模块区域的高度等级 $T(a_i)$ 所得的差值,即

$$h = T(a_{i+1}) - T(a_i) \quad (9-10)$$

式中, $T(a_{i+1})$ 和 $T(a_i)$ 是在考虑测站海拔高度前提下确定的,如果区域内测站数目较多,则取其平均。

s 是所在测站与海洋边缘(海岸线)距离的差值,如果距离在0.5个纬距内,等级取为0,0.5以上取为1。即距海洋远近等级 $M(a_{i+1})$ 与 $M(a_i)$ 之差值,即

$$s = M(a_{i+1}) - M(a_i) \quad (9-11)$$

(4) 物候模式识别之属性文法

该文法用 Chensky 四元式表示,即

$$G_a = (V_N, V_T, P, S) \quad (9-12)$$

式中, V_N 是非终止符的有穷集, V_T 是终止符的有穷集, S 是开始符, P 是生成规则的有穷集。 P 含两部分:①句法规则;②包括连接关系和语义规则的语义部分,下用CAT表示。这里所谓连接关系,也可以是这种关系的集。

下面,结合物候识别的图9-7和图9-8具体说明 Chensky 四元式内容。

$$V_N = \{S, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8, N_9\} \quad (9-13)$$

$$V_T = \{\chi, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \delta, \epsilon\} \quad (9-14)$$

P :

$$S \rightarrow \chi N_1$$

$$N_1 \rightarrow \alpha N_2$$

$$N_2 \rightarrow \beta N_3$$

$$\text{CAT}(0, -1)$$

$$N_3 \rightarrow \gamma N_4$$

$$\text{CAT}(8, 1)$$

$$N_4 \rightarrow \delta N_5$$

$$\text{CAT}(4, 1)$$

$$N_5 \rightarrow \nu N_6$$

$$\text{CAT}(-3, -1)$$

(以上是外基元部分)

$$N_6 \rightarrow \eta N_7$$

$$\text{CAT}(2, -1)$$

$$N_7 \rightarrow \delta N_8$$

$$\text{CAT}(4, 0)$$

$$N_8 \rightarrow \epsilon N_9$$

$$\text{CAT}(-3, 0)$$

(以上是内基元部分)

这里专用属性文法 G_a 与一般的 Chomsky 文法的区别在于:在两相邻产生式之间,加入了表示终止符高度差异的属性和距海洋远近差异属性。

随着物候观测记录年限增多,输入到机器中待识别图形将越来越多。但由于分类和属性相对于资料年限的长度来说,往往是比较多的,以致干扰不可避免,在有限的年限内,很难找出绝对相似的图形,所以必须按照需要与可能,找出比较相似的图形,即放宽条件,找出主流相似的年份即可。

3. 应用途径

每年一幅的大范围物候图的识别结果主要有以下几种用途。

(1) 找物候的历史相似年

原有的物候研究者,多凭当年观测记录,用可回忆的年份进行一般的对比分析。有的虽未写成文字材料,但群众也常说,今年榆树始花期早,春天来得早。首先,从地域上来说,这只是一个测点上物候期的对比,不能说明面上的情况以及该点与其他点的联系;其次,从时间上来说,这只是观测者经历的近几年的对比。而大范围的物候图恰是避免了上述的两种缺点,是同时综合观察多点结合的情况,在识别时,把当年取得的最新记录输入机器,抓住图形的主要特征,看出物候的历史相似年。试想:如果没有一定的模式识别标准,而是凭人的视觉分析,则很难找出什么特有的规律,如果物候图太多,识别是不可能的。

(2) 配合其他大范围图,找出与物候相关的其他相似年

从历史资料来说,可以绘成图形的资料,是最为完整的气候资料,其中生物气候意义最为明确的是平均气温数据。利用平均气温中与物候期关系密切的月份作出相应的温度二维场图。在进行识别时,可通过逐图对照,找出相关关系,如果找出物候、气温之间的关系,还可以从原理上分析大范围物候推移的气候生态动力源,从而当气候变化时,为生态环境优化控制,提供科学依据。

在生态动力汇方面,可对农作物大范围布局进行分析,并给出相应的大范围作物布局图,再通过与物候图的对比,评价大范围物候对作物布局及最后收获量的影响,是农作物对物候乃至对气候响应评价从单点到小区域再到大范围的尝试。当然,这样评价的施行,不限于始花这一物候期。

(3) 自然物候期与农时作业期对比

古往今来,我国有许多关于物候和农时关系的谚语,往往有地方性,但地方性范围大

小,不易确定。其实,如果所谓的地方性,面积再扩大了,也有可能成为越来越大范围的“大地方性”,对一个大区域可能有普遍性。但对地方性和普遍性的界限以往很少研究。如今有了用模式识别方法来识别二维场的技术,就可以对大范围作尝试。如将水稻插秧期同榆树发芽期、始花期从图上作对比,可看出演变趋势一般还是一样的。找出这样的规律,可探索出物候与农时关系,这种关系往往可以用生态动力学解释。而运用找到的关系,农业行政部门指挥全局性的生态控制则有更多的科学依据。

二、每两日一幅的大范围物候图的识别与应用途径

前面一段所述的每年一幅的物候图只能在年内同一发育期自南向北推移全过程完成之后才能绘成。如前例所述关于榆树始花,只有在5月上旬才能绘成一幅等物候期的二维平面图。其他发育期也有类似情形。这样得到的一系列物候等值线图,一般只具有农业气候分析与评价意义,而没有即时为农业生产和管理提供必要信息,为人工生态动力源的合理控制提供决策建议的意义。在高新技术普及有限,通信设备条件尚较落后的20世纪80年代以前,提出这种似有天气意义并随时审视物候进程的设想,看来是为时过早;但在21世纪初,提出并倡导其早日实施,合乎时宜。

1. 待识别图形的制备方法

根据我国物候观测的规定是每隔1d观测一次。中国气象局的规范也是如此。

每两日一幅图形的制作方法,与每年一幅图形的绘制方法大同小异。不过由于物候出现得迟早,在我国辽阔土地上,差异很大,所以每两日一幅物候图是不可一次绘成的。春季一开始只能是用南方几个点的实测记录绘成的线条图,待过一段时间,才能在少数模块中体现出待识别基本特征。

2. 应用途径

(1) 物候图形信息应用

这种物候图形的信息,对大面积农业生产决策有重要作用,下面简要介绍。

每两日一幅的图形,可以同前两日的图形作对照,从而得出物候推移的动态信息,这对了解大范围物候变化规律并由此得出大范围生产决策结论是有益的。比如某张图表现出“枣发芽”这一物候期已自南向北推至 41°N 纬线上下,又从其前推移速度看,大约为 $0.3\text{ 纬距}\cdot(2\text{d})^{-1}$,这样再查阅数值天气预报96h内无明显降温过程,并且不采取人工增温措施,外推结果是:未来4d可推移0.6纬距,于是可考虑预计在原纬线以北并且比原来高0.1~0.6纬距的狭窄地理带内,枣树会发芽;又依据物候动力预报,预计该狭窄地带内,可以种植棉花。这是直接用于生产安排决策的例子。如地貌、土壤、水文等原预计随时间变化不大的生态动力源要素发生突变,所作预测和决策建议,当然要相应调整。

(2) 与遥感图像信息结合应用

在前一节,我们简述过遥感图像的模式识别技术。随着那些技术的发展,对陆地生物识别能力的增强,其识别结果可与目测记录下来的物候资料结合使用,以弥补物候测点稀疏而引起的资料不足。比如,在第三章,我们曾举出用Landsat卫星资料判定水稻生育期状况的例子。这完全可以同有限的站点稀疏的水稻实测物候资料结合使用,必要时考虑自然物候观测数据与它们的关系,以使大范围的决策建议更有客观性,为生态控制增加了一种新的工具。

物候图与遥感影像图的结合应用,犹如气象工作中,卫星云图同一般天气图(或数值预报图)结合应用。为了找出比较客观的对应规律,从一开始就向着尽量量化的方向发展,以期这些有限但又不可或缺的信息能为农业生态的大面积宏观控制提供较为可靠的依据。

三、同一时间不同物候期的图像识别

这种识别技术,旨在了解同一时间在不同地势,不同纬度上,植物所处发育期的状况。

1. 表示物候-纬度关系的图形识别

在北半球陆地上,由于纬度差异导致温度差异,以致南北物候差异的规律能够在生物物理和生物化学的原理上得到解释。为此,我们可以选择一种在不同纬度上都有的植物,将日期固定,视察其发育期差异。这种差异连续变动的识别,尤其是见有突变,易采取必要措施促控相应农作物的田间管理业务。如在冷害前灌水,冬小麦拔节期注意晚霜冻等等。图 9-9 示 4 月 18 日垂柳发育期纬度差异。

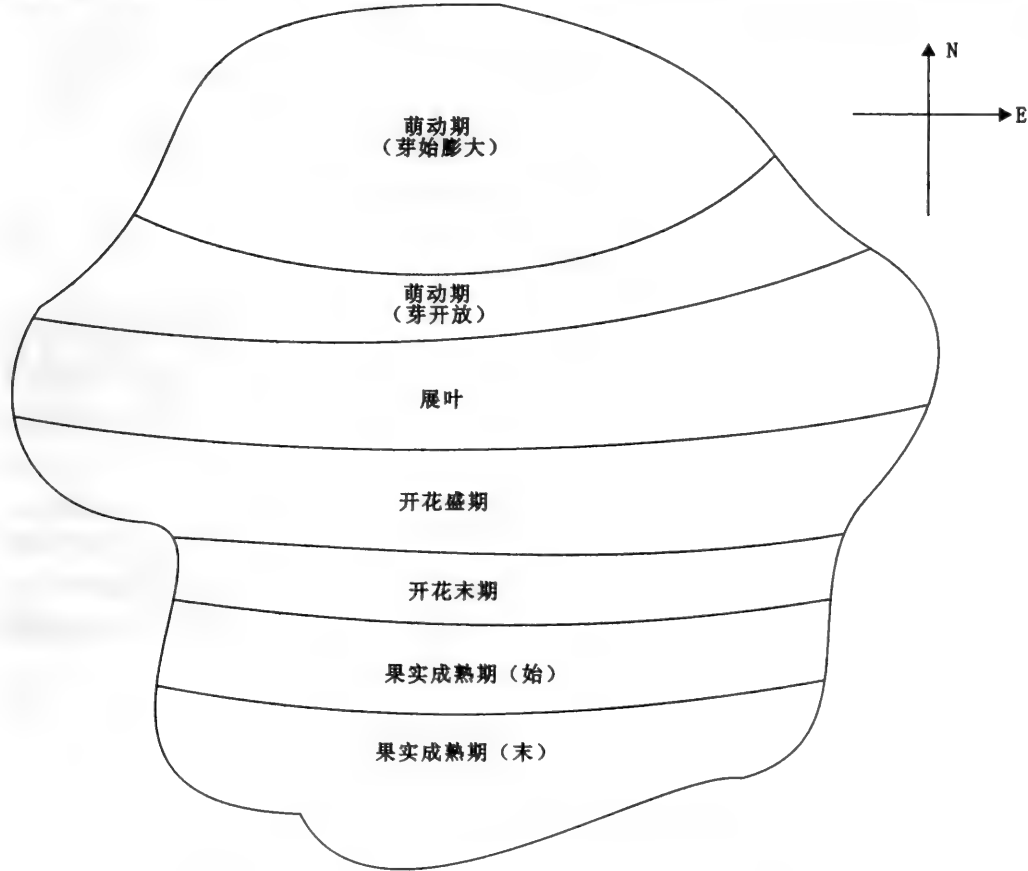


图 9-9 4 月 18 日某区域内垂柳南北物候差异

2. 表示物候-高度(兼顾与海岸距离)关系的图形识别
意义与方法同物候-纬度关系,图 9-10 表示某山区梯度观测差异。

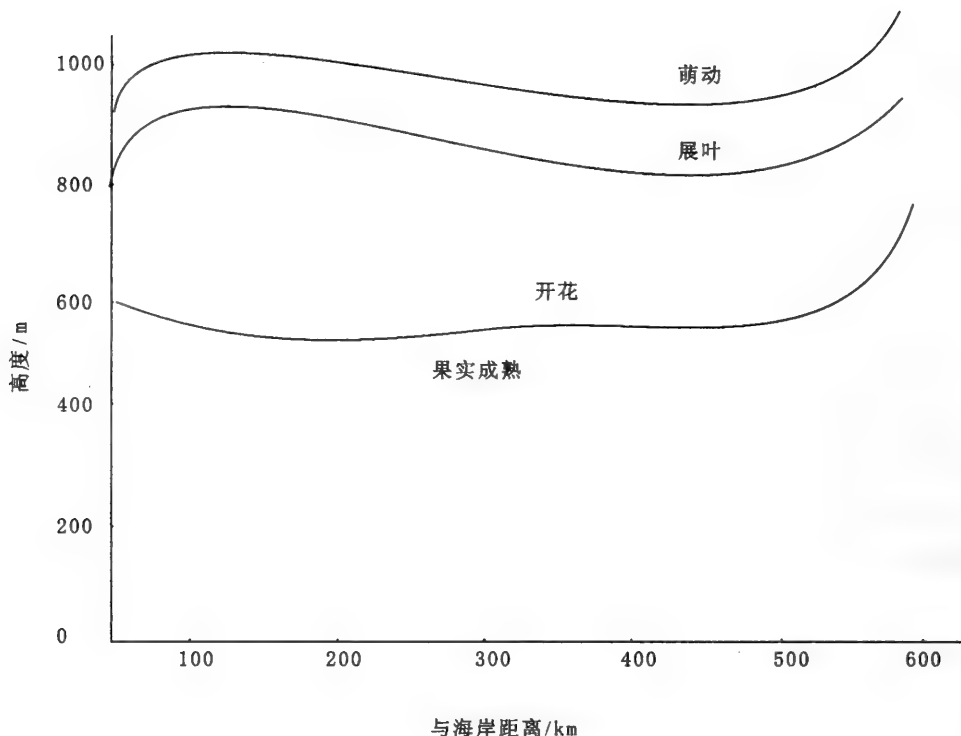


图 9-10 5 月 16 日某区域不同高度(兼顾与海岸距离)物候差异

四、植物生育期生态动力源因子状况的模式识别

进行这种识别的目的是,寻求植物各发育期中受各种生态动力源因子影响的状况,或在有条件时,对未来发育期状况进行预估,以便采取优化控制措施,在人为可能条件下,优化控制某种或某些生态动力源,以适应植物生育需要,促进获得较好生态经济效益。

1. 基本条件和准备工作

从机理或统计学上正确找出待识别植物各发育期的生态动力指标,是识别结果能否客观的关键。最好的办法是从具有权威性的经典名著查出指标,比如金善宝院士关于小麦的著作、李竞雄院士关于玉米的著作、任继周院士关于牧草的著作等,并注意所查指标的适应性和时效性等。

指标涉及各类生态因子,包括温度、湿度、土壤墒情、土壤肥力、周围植物状况。通常要从中找出对植物影响大且变动也大者。

在研制识别技术实施步骤之前,准备好一切必要的物候期实测资料,年份越多越好。并且,可以通过适当的订正手段,对某些资料作内插或插补,以求完善。

2. 用实例说明的识别过程

现以我国普遍种植的一种主要农作物玉米为例,说明识别过程。待识别的要素很多,现只以空气温度为例。根据历年在同一地区不同地点对生育期相似的玉米的观测记录进行分析。因为玉米品种分为早、中、晚熟,不同品种生育期差别较大,所以尽量选用同一品种或相似品种,或作必要订正。

为了识别在玉米生育期内各发育期环境温度与指标温度之差异(图 9-11 中的温度距平),从气候数据库和作物发育期物候资料库中,调出相应数据,经初步加工得出像图 9-11 那样的一系列的曲线图像(每一个地点每个年份一幅)。

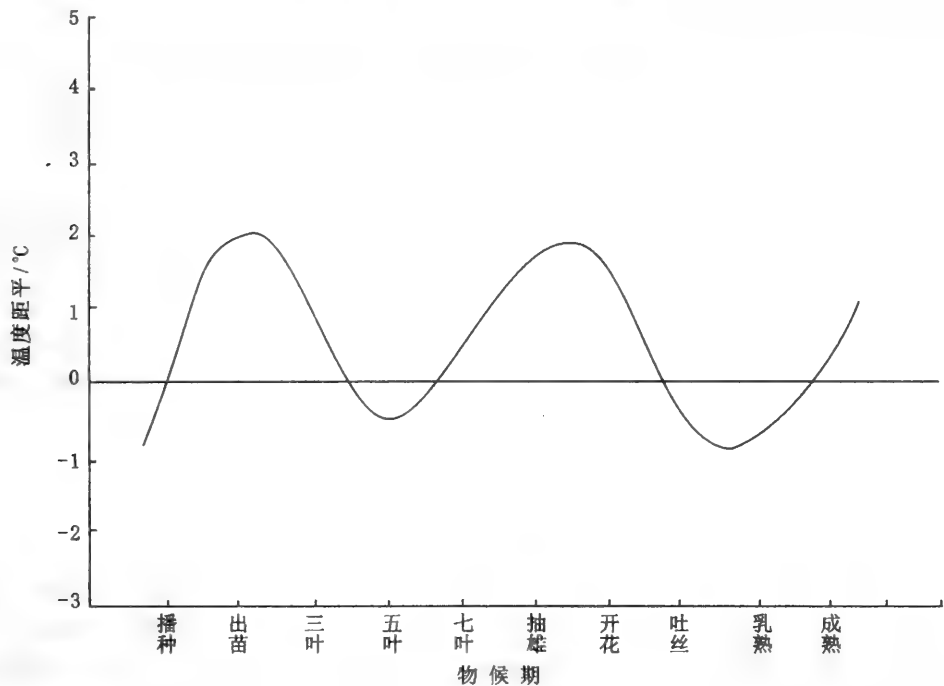


图 9-11 玉米物候期内温度距平示意图

面对这些图像(图形),如果用人的肉眼去识别分辨蕴含于其中的规律,就比较困难了,在资料年数较少且待识别观测点较少时,这样的识别工作尚可由人而不用机器来完成;但是,如果有 30~50a 的数据,有 3~5 个观测点需要识别时,人的肉眼便无能为力了。而从应用角度来说,我们总希望同时识别多年、多点的图像,因为资料年代越长,待识别的点越多,识别的效果越好,依此采用的生态控制措施也就越有效。为此,针对像玉米这样的植物,就有关生态因子,一一绘出曲线图形。这样,若同时识别的对象有 a 种作物, b 个生态因子, c 个观测点,就应绘出 abc 幅曲线图。绘出图后一般即可用语言方法进行识别。作为纵坐标的因子,一般用距平表示。如玉米播种期适宜的温度指标是 8°C ,而实际温度为 7°C ,则纵坐标为 -1°C 。在粗作识别的时候,只分正、负和零三级,分别用 P, N 和 O 表示,这样与图 9-11 中对应的温度字串就是 NPPNOOPNP。

将多个字串存储于机器之中,具体识别时,将待识别字串输入,同已有字串进行对比。

识别的主要目的是进行植物物候(作为生态动力汇)与生态动力源因子之间关系的对比分析诊断。所谓物候分析诊断,就是对多年的物候观测记录和有关生态动力源因子记录所反映出来的生态动力源和汇及其之间关系的特征,用各种不同方法有效地表达出来。句法模式识别中曲线特征的识别,目的用于分类。从图 9-11 那样的曲线图形中,可以看出,为了对比和分类方便,各个发育期的有关生态因子的要素都是以等距离(或正,或负,或无差异)处理的,事实上,比如温度的差异,从生物意义来说,并非都是等距离,有时甚至大相径庭,像图 9-11 中的 P,少者在 0.5°C 以下,多者在 2°C 左右,我们之所

以按等距离处理为 P,是因为无论是 0.5℃ 或者 2.0℃,都表明在指标温度之上,都不会给玉米造成低温生态逆境,只要温度不超过极限,也都不会带来高温生态逆境。

识别结果,如欲用于生态控制之实践,一般要利用物候曲线演变的图形来作预报。一般,首先推测未来发育期内某要素的范围。如就温度而言,可利用时间序列分析,也可用中期数值预报的模式输出图,作 MOS(Model Output Statistics)预报。如果在 9 个连续的发育期中,前 7 个发育期识别结果相似,则可推测第 8 个发育期有可能相似,又用温度预报订正,依需求,采取促控措施,比如在预料有冷害之前灌水,在预料有霜冻之前防霜,以使作物发育期按人们推测理想化时期内出现。这当然是很好的生态控制了。

我们为方便,只举少量例子。植物、动物之多,分布之广,是作者不可能全面了解的。所以,读者在应用时,要结合自身待研究的对象作识别。比如可针对多年生的树木,药用植物人参,当然方法也完全可推广于淡水水生生物或海洋水生生物。

模式识别所用的软、硬件,尤其是硬件设备,当然得依靠计算机专家和自动化专家。但在初创阶段,在研制软件时,须有生态工作者参与,以便研制成功后成为专门的用户。

第四节 生态控制集成型模式识别

人与机器相结合的基本思想是在 Wiener 创建控制论的初期就已经有了的。在计算机发展起来以后,形成了人与机器相结合的智能系统的概念,这种智能系统强调的是人脑与电脑的结合,是人类的心智与计算机高性能的结合。我国著名哲学家熊十力研究员认为人的智慧,通常叫做心智,而心智又可分为两部分,一部分叫做“性智”,一部分叫做“量智”。性智是形象思维的结果,难以用电脑模拟;量智是通过科学训练而形成的智慧,是逻辑思维的体现。人工智能研究表明用电脑模拟逻辑思维可获成功,而用现在的电脑模拟形象思维则基本上是困难的。

关于智能系统,钱学森院士早在 1991 年有一段精辟的论述,他指出:“智能系统是非常重要的……。我们要研究的问题不是智能机,而是人与机器相结合的智能系统。不能把人排出在外,应该是一个人机智能系统。”

在智能系统运用于生态系统的研究中,注重人的作用,注重形象思维非常必要。所以,在我们试研究模式识别于农业生产中应用的时候,对于人应该重视,而不是单纯地去找适当的机器设备和软件。当然,热中于智能系统有两部分人,一是人工智能及有关学者,另一方面是有生产经验的农业技术工作者,还包括一些农业生产能手。他们的逻辑和形象思维,对于生态集成型模式识别系统原理的处理和建立,都会起到重要作用。

在生态农业研究中,常会发现,有些高产、优质、高效农业技术的实施者,在实践中,取得了良好效果,但其他人不易学会。人们对于这些经验的感觉往往是难于学习,犹如“只可意会,不可言传”。其实,这些第一手的典型经验,是从农作物与生态环境关系的整体来辩证地看问题的结果。比如,在陕西关中,植棉能手张秋香,她对当地自然条件了如指掌。在多次生产讨论会上,参加讨论会的除农业劳模外,还有各学科的专家学者,他们往往是站在自身熟悉专业的学科基础上,以逻辑思维的规律,对待种棉花这一问题。比如关于对待棉花适时早播问题,气象专家考虑温度、降水等气象要素;水文专家考虑抗旱播种;土壤专家考虑的是土壤质地;植保专家考虑的是苗期病害是否发生等等。这样,容

易以局部为主,采取某种措施,带有强的专业性,对待逆境的生态控制容易误入只治标的思路。而对劳模的经验,提高到理性认识,学以致用,则可提高农作物产量与质量。高产典型创造的优势在生态方面主要从作物整体状况考虑,对于生态逆境进行综合诊治。其实,生产能手,他们通过眼、耳、鼻、舌等感官获得相当多的信息,是在没有计算机时代的一种“土法”模式识别,把感官感觉到的土壤水文生态信息与已有的认识 and 大脑中存储的生态控制机器模式从整体上加以比较,进行搜索与匹配,找出并识别“形象”。而这种搜索与匹配的效率和情感密切相关。从以上这些方面加以引伸来探讨形象思维,抓住了问题实质,避免了生态逆境或采取人工措施,局部改变生态条件,使之增优,获得了较高的生态产量。这同充分发挥有理论知识的专家作比较,并不矛盾,而且相辅相成。在《生态动力学》一书中的方法论部分,作者反复强调科技信息和读书作用,这与识别先进典型的增产经验,也是不矛盾的。

我们采用生态逆境诊断来对形象思维作类比,也许会对形象思维在生态农业逆境控制乃至在生态智能控制中的意义,有进一步了解。从生态逆境诊断来加以分析,首先是“立象”,以“农作物春季播种期的优化控制适时早播,何为适?”为例,研究者通过多种媒体,在看棉田土壤墒情、测定田地里 10 cm 左右深度的土壤温度是否达到指标,预测未来 5d 是否有寒潮降温天气形势的同时感知及自身经验体会(含感性认识和已有的某些定量分析认识),建立子模式,再形成与威胁棉播的生态逆境模式类比,“立象”的过程是研究者与大量的生态逆境是否危害棉苗的许多生态动力源与汇的接触,是学习和诊断的过程。棉花适播期所涉及的许多生态动力问题构成一个复杂巨系统,立“象”于是成了一个十分复杂的认知过程,因为不仅有当时调查、观察、观测得到的知识,还有与以往若干年前类似情况对照,作模式识别过程,比如物候识别,就要用到本章中第三节所述知识;从地域上认识,不限于本地,因为我们要想知道未来 5 d 是否会降温,有否降水,是构成棉籽未来几天是否受寒、是否构成“旱象”的基础,为此要用 120 h 内的中期数值预报,而这样的预报涉及的信息源范围是北半球,至少是欧亚大陆,从三度空间来说,是考虑了自地面到对流层顶,对其他生态因子处理,也是如此。关于播种问题的认识过程,是在多种分析基础上实践与经验总结的过程,是多维的自下而上的综合集成过程,不论用多少仪器设备,研究者是主宰,最终通过研究者大脑沉积,形成表征与各种生态逆境相对应的各种模式类的“意”,达到立象意义目的,见图 9-12。在此过程中采用以象说象的办法建立一个描绘整体形象的比较抽象的句称为“意”。研究者对作物适播期生态逆境的诊断是靠对有关的生态动力源、汇的整体了解,以“意”之间的相似性来加以判断。以象说象的办法可以用一个二元式来表示一个模式 P 的方式加以表达, P 包括象(用 I 表示)与意(用 E 表示),表示两个成分 $P = P(I, E)$,其中 I 称为模式 P 的象,包括感性成分与理性成分; E 称为模式 P 的意,是一种比 I 更为抽象的象,也包含感性成分和理性成分。由于感性与理性相通,所以 E 可以认为是从 I 通过综合集成,即从定性到定量的综合集成得出的结果。

钱学森的综合集成方法论提出后,人们了解到人们的性智重要性,那么在识别系统中,怎样才能充分发挥人的作用呢?对此,戴汝为院士最近(2002)指出:“采用人工神经网络方法来研制识别器,并把若干个识别器加以集成。具体办法是用一个多层次网络作为集成网络,并采用有教师学习或称监督学习(supervised learning),充分靠人作为教师的作用来训练各个分类器,然后再训练集成网络,通过两次介入(教师)的作用,从而提高识

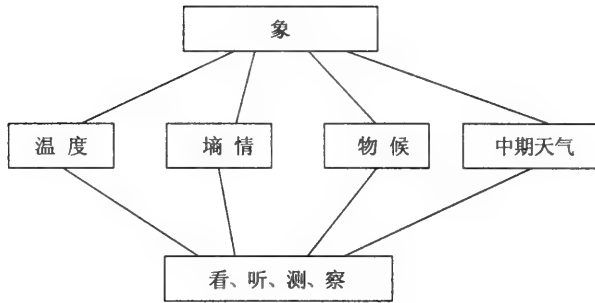


图 9-12 生态诊断(以棉花播种为例)立象示意

别率”。戴汝为院士指出充分发挥人的作用途径,是一种正确可行的好办法。虽然,在农田生态以及整个生态控制方面,目前尚未实现监督学习的分类器和集成网络,但他所指出的方向,对于生态控制的模式识别智能化水平的提高,至关重要。因为我国是个有着悠久农作历史的大国,古往今来,农业实践者和广大技术人员,有非常丰富的实践经验,近一二十年,又有许多结合这些经验的新技术产生。上述举出的适播期是个例子,其实在生产中,对生态控制的需求,是非常广泛的。迄今,有许多问题尚待解决。20 世纪 90 年代,我国北方曾讨论过“三才论”在农业生产中的作用问题,虽然“三才论”系我国古代农书记载,但结合现实农业生态控制问题确有意义。随着大农业发展,我国在模式识别中能起到“教师”作用的人则会进一步增加,其科技水平会进一步提高。这样的“教师”作用将使分类器、集成网络效率提高,识别率提高。再加上仪器设备条件较好,我国对于农业生态控制集成网络的研究和推广将会起到促进农业现代化发展的重要作用。一个重要的事实是集成网络可以从输出层(类别)反馈到输入层(类别),从而通过从输出层到输入层的反馈形成一个非线性动力系统,使整个集成网络成为一个非线性生态动力系统,或称为集成型生态控制识别系统。

第五节 生物图像信息

动物(包括人)、植物、微生物的形态特征,是生态动力汇控制中不可或缺的信息资料。众所周知,普通生物学、农学、医学、药理学方面的文献中,有许多用图形、照片等表示其特征的资料,这些是生态控制所需要的,但面对这些没有经过现代自动化技术加工处理的图,人们对其中的微观信息特征很难定量判明。比如家畜和人的细胞,因在某种生态动力源作用下发生异常变化,只凭目测和经验是难于判断的;又如受害的农作物,在干旱作用下其细胞变化,人的肉眼和显微镜几乎很难判定。由于自动化技术发展,尤其是近 20~30 a 发展起来的模式识别技术,则可借助机器视觉自动观察,并显示给人们。《生态动力学》一书(见第 338 页)在讨论生态动力模式识别方法时指出:模式识别所应用的领域是多方面的。……微观的,像对于受干旱、水灾、低温之害的作物细胞的识别等等。相信,在今后不断应用中,会得出更多有意义的结果。这里,仅就微观识别可获得生物信息情况,加以简述。

1. 用细线化方法评估植物胚芽发育状况

利用图像细线化处理技术,计算植株胚芽生长形状,从而识别生长正常和畸形的胚

芽。最终选取正常生长的植株胚芽移植到生态动力源条件适宜的地方。

2. 黄瓜分选的图像处理

利用黄瓜的外形尺寸可以对黄瓜进行分类,分类的指标是黄瓜的长度和弯曲程度。

3. 依据颜色分析植物营养状况

植物的生长和营养状况,可以由叶片颜色的变化、斑纹分布和形状表现出来。各种不同元素的缺少,可导致叶片表面颜色的差异,因而人们可以按颜色特征作分析,进而根据植物对营养元素的需求,来自动地施肥、施氧。这一领域的研究对作物栽培的自动化、智能化有深远的影响。这些处理和识别工作,都是在可见光下实现的,因此,可以用彩色摄像机和图像采集片获得数字图像,有人以茨茹生长为例,研究过在缺少 Ca, Mg, Fe 等元素时,叶片颜色的变化。

4. 通过颜色识别马铃薯和苹果成熟度

颜色是与农产品质量有着非常密切联系的一种特征。蔬菜、水果的颜色显示其新鲜程度、成熟程度和缺陷所在。马铃薯、苹果的人工检测,须耗费人力、物力和时间,而用计算机作色检,可以对它们进行自动分类。

5. 畜(禽)肉的纹理检测

对正常和非正常的畜禽肉由可用纹理检验方法加以区分。有害人体健康的畜禽肉,其纹理比正常的粗。这样,通过 Fourier 功率谱特征,就能清楚地分辨正常与否。

6. 利用灰度共生矩阵描述烟叶机体结构

在图像灰度共生矩阵上,如果被检测区域呈现细的纹理,即说明烟叶机体结构紧密,其灰度共生矩阵则远离对角线。依据这些特征以及其他方面特征,可以确定烟叶表面特征参数,加以区别。

7. 细胞特征模式识别

为了了解植物在干旱、低温等致灾生态动力源作用下,植物受害的本质特征,在作物生育期干旱或低温等生态逆境条件下,不同作物、同种作物不同品种之间受害程度差异,从田间取得玉米、高粱、水稻的样株,对细胞先在电子显微镜下摄影,继后用计算机进行细胞分析,从而为了解作物灾情提供必要依据,也是为生态控制服务的一种自动化侦察手段。

8. 杂草综合特征分析

为控制杂草生长,须对杂草进行自动识别,并控制喷药系统,使除草自动化,用灰度、颜色、形状、纹理综合特征,识别杂草状况,以此作为控制杂草的一种优化生态控制技术。

第六节 人工神经网络在农田生态控制中的应用

人工神经网络(ANN)把算法和结构统一为一个系统,是一种硬件和软件的混合体。由于它在某种程度上模拟大脑的结构,所以这种系统有更高的智慧,有更快的运算速度。Rumelhart 曾从 8 个方面说明神经网络构成的原理和特征。ANN 的运算逻辑与 AI(人工智能)实际上是相同的。比如说,识别事物时,均采用等价模型。以识别冬小麦干热风为例,当夏季温度高、湿度低、风力大三要素重叠时,便判定为干热风的生态动力条件。下面,让我们讨论利用人工神经元作生态控制决策的问题。

依据生态动力预报作生态控制决策,是在已知生态预报条件下,按某种机理,显示出明确生态意义下的措施。也可以是按预报结果应采用的随机措施,此时可同像 MDP 那样的方法接轨,以达优化控制的目标。

在农田生态调控中,可利用美国 Neural ware 公司开发设计的 Madaline 神经网络模型,该网络有输入层、中间层(Adaline 层)和输出层三层单元。当用于生态调控时,其输入层有四组输入单元的相应输入数据的输入格式。在我国中原地区,冬小麦是面积最大的重要的粮食作物,在春季如因寒潮冷锋之类的天气袭击,突然降温,冬小麦易遭霜冻,作为寒潮天气这一生态动力源的生态动力汇,如处于拔节这一物候期,则受害严重,须及早采取某些控制措施防霜冻。这样控制霜冻的备战行动,应以中期(比如 5d)生态动力预报为转移:如果遭霜冻威胁可能性大,而事前准备不足,势必临阵措手不及,以致使霜冻大大危害冬小麦,导致减产;反之,威胁不大,盲目准备防霜,劳而无功浪费人力、物力,带来不必要的损失。为优化这种过程,从农田生态动力学基本原理出发运用概率统计等现代数学工具,精选出 4 种生态动力因子,以其相应的可测数据作为输入单元。它们分别是:①从欧洲中期天气中心的模式输出图和预报图,看未来 120h 内,主冷锋是否能达到某一纬度以南,如果可到达该标准,编码 1,否则编码 0;②未来 120h 内当地风力大小,小于 3 级,编码 1,否则编码 0;③土壤墒情,较好,编码 1,否则编码 0;④未来 120h,冬小麦的物候期,拔节,编码 1,未拔节编码 0。输入层按一组数据,比如有 30 组样本,则有 4 个输入层,共 $30 \times 4 = 120$ 个码(用 1 或 0 表示),输入机器,输出层有 3 个单元,分别对应“不予防御”、“一般防御”和“加强防御”3 种控制措施。中间层共有 15 个单元,分 3 组,每组只有一个输出单元有固定为 1 的连接权。这样一个输出单元实现对中间层相应组单元输出的大数表决。在这个网络中,各单元的输入、输出模式为双极值(-1 和 +1,其编码分别为 0 和 1)模式。网络的学习仅仅发生输入层单元到中间层单元的连接权上。对于一个给定的输入模式,如果网络的实际输出与网络的希望输出匹配,Adaline 的输入连接权就不发生变化;当实际输出与希望输出之间有误差时,在中间层中其激活值(加权输入)最接近于零的那个 Adaline 所对应的输入连接权向着减小网络输出误差的方向变化,这就是 LMS 算法。对于其他模式,重复上述过程,直到网络收敛为止。

用于网络学习数据(来自数值预报的模式输出数据、风的地面观测数据、土壤墒情实测数据以及冬小麦物候期数据)均须按约定标准编码后,才能作为训练模式集。由于 Madaline 网络要求输入模式是线性可分的,可构成各自的取值段。输入机器处理后,得出的输出结果便是应采取的控制措施。

与此类似,对于农业生产中常用的许多其他农田生态控制措施,可用类似方法完成。它们是:

① 喷雾防霜措施的优化控制:针对的作物有茶树等,其有关生态因子数据主要是通过试验取得的,包括叶温变化、有效喷雾强度与空气温度的关系、喷雾一定时间后(比如 20min 后)温度的变化、天气条件(风力、风向、大气湿度)变化等。输出的结果是喷雾强度。

② 小麦干热风防御的优化控制:这也是大约以 5d 为一段的中期决策,依据是干热风指标(温度高、湿度小,风力大)及其对灌浆期小麦的危害。可依中期天气数值预报图、地面气象要素实况和物候预报,将数据转化为代码,作为训练样本输入;输出为控制措施的类别。

③ 大田作物施肥控制方案:主要目标是抓准施肥时间。为此,依作物的生物学特性,以及土壤肥力、作物长势、物候期和中期天气预报,进行编码输入;输出则是施肥的“适期”、“不适期”、“最佳期”。

④ 冷害防御:依据具体作物特性和有关冷害指标等,结合天气条件,作出防御决策。输入的数据包括:未来是否会出现足以引发作物冷害的低温指标、作物处于何发育期以及作物抗逆能力等,编码输入后,可输出应采用防御措施的控制结果。

当然,人工神经元网络用于农田生态控制,刚处于原理研究暨理论设计阶段,待处理的问题,尤其是实际应用,尚须做大量工作。

第七节 人工生物环境温度的智能控制

人工创建的生物环境,比如温室、玻璃房、畜舍、禽舍以及利用空调的人居环境,是人工控制的生物环境。

对于这种环境,人工控制的目标是尽量满足生物需求(以生态控制标准为准),同时尽量利用天然的生态动力源以节省人工能源,使生态经济效益达到一定标准。由开关控制,比如我国北方,日光温室系以太阳辐射能为主要能源,按作物或畜禽对热量、水分和风的需求,通过开口放风、揭盖草帘等人工控制措施,也可视为以生产经验为出发点的适应生态需要的开关控制,必然随控制论发展而发展到模糊控制、神经网络控制等智能控制。这些控制的基本目标,首先考虑温度这一生态要素的控制。下面论述暖风器控制温度的智能控制原理。

对于暖风器这样的现代设备,比如严冬时用于现代温室的暖风器,它不仅要有御寒的功能,而且要求伴随着适度的气流、温度的变化,使动物(包括人)感到舒适。让各种生物“享用”所须的生存指标温度、湿度和通风条件。传统的取暖器可将室温控制在一定的指标温度范围内。但是,暖空气常常停留在控制环境的上方部位,室内上下温差较大,这样的环境温度通常不能很好满足生长在其中的生物,尤其是栽培植物的需求。为了利用室内不同空间部位的不同温热条件,有时不得不实施立体栽培的空间布局手段,比如将要求温度较高的蔬菜作物用吊篮悬挂于上部,把要求温度较低的作物栽培于地面。这样做,虽然能适应环境条件,但是由于发育期、防治病虫害等的差异,给作物优化布局带来许多麻烦,而且使揭棚、放风等室温调节措施更加复杂化,以致使本来存在的生物与环境之间的协调关系失去控制,导致严重的后果。为解决上述问题,可采用混沌控制暖风器,采用对流扇使风量上扬,进而使室内空气充分流动,改变室温的不均匀性,以满足生物生长的需求。

这种设备的关键部分是混沌仿真器,它将混沌理论用于生物温度环境调控的基础设施。混沌仿真器由混沌信号生成部、混沌性判定提取部、非线性系统辨识部构成。

混沌信号生成部通过 Logistic 映像、间歇性映像等以及简单的数学迭代方程产生具有混沌性的时间序列信号。

混沌性的判定、提取根据表 9-2 所列的混沌特征及判定标准,来判定所观测的时间序列信号是否具有混沌性。仿真器是用谱分析、自相关函数和 Ляпунов 指数作为判定各个特征的基准,进行混沌性判定的。

非线性系统辨识部能够根据对具有混沌性的系统和包括其在内的非线性动力学系

统的辨识,来预测、推断系统的状态并进行控制。在系统辨识中,由于采用了单独的自增殖型神经模糊模型,因此可以大大缩短构造最佳模型所需要的时间。

表 9-2 混沌性特征及判定基准

特 征	内 容	判定指标	判定标准
轨道不稳定性	即使初值稍微改变混沌动力学系统解的轨道就变得不同	Ляпунов 指数	Ляпунов 至少有一个是正值
	混沌动力学系统中不能进行长期预测	自相关函数	自相关函数随着延迟时间增长而收敛于零
解的非周期性	没有明确的周期性	谱分析	特定的频率域内不存在峰值

下面让我们简述混沌产生生物所需求暖风的机理。所谓生物所需求的暖风,实际上是依据生物指标温度的一种温暖的人工气流,这种人工气流的温度、流动速度的变化,都很缓慢,呈现出一种“轻轻摇摆”、“微微波动”的态势(该摇摆、波动的状况,可用温度、微风测定仪器进行测试)。这样的暖流当然视为一种混沌现象。

最后说明一下其运行效果。根据生物的温度指标,人为地对温度实施智能控制,这种控制与传统的控制方法相比,使室温的均匀性得到改善,从而使生物产品质量提高,产量增加,并可以节省能耗,有利于发展“高产、优质、高效”大农业,增强人居环境的舒适度。我国设施农业规模很大,生活于其中的生物种类极多。相信,随着农村经济实力和科技意识增强,在不久的将来,环境智能控制措施会广泛应用。

第八节 生态控制专家系统

专家系统(expert system)来源于人工智能,它是人工智能面向实际应用的三个分支(机器人、专家系统、自然语言理解)之一。1969年,美国 Feigenbaum 公布了第一个专家系统 DENDRAL,这被认为是知识工程的开始(戴汝为,2002)。

专家系统就是研究利用针对某个专门问题的专家的知识,建立人机系统来进行求解的。据此,生态控制专家系统应是针对生态控制这一专门问题的专家系统。该系统涉及生态专家以及涉及生态动力源、汇诸多方面的有关学科专家——合称广义的生态专家——的知识,包括他们中每个人所掌握的公开知识和个人的经验性知识——启发式(heuristic)知识。这些知识是广义的生态专家(下简称专家)区别于非生态专家的标志之所在,它能使专家在必要的时候作出猜测、作出抉择,辨别出有希望的解决生态控制某些问题的最优途径,并能有效地处理错误的或不完整的数据。

一、发展生态控制专家系统的必要性和现实性

从本书绪论及前述有关内容可知,迄今,生态控制中有相当多的问题,并不是凭经验或靠某些解析式即能很好解决。因为即使研究某些具体的控制问题,也往往涉及大系统乃至复杂巨系统。如无多方面专家知识的共同努力,难以求出合理的解。所以总体说来,具有广泛的社会需求。另一方面,随着生态控制原理发展,专家知识不断丰富,大量资料信息的存在,使系统建立和推广,有物质和人力基础。具体论述如下。

1. 有助于生态控制知识的继承

如所周知,生态控制知识是长远积累的结果,亟待世代继承,如间断,损失不言而喻。

我国是文明古国,生态控制知识自古有之,由于种种原因,没得到应有的发展。直至 20 世纪 70 年代末,随着生态学受到重视,生态控制问题才逐渐提到议事日程,然而,中间确有相当长一段时间无人问津。比如,早在 20 世纪 20 年代就有了 Lotka - Volterra 生态方程,在我国至迟在 70 年代末 80 年代初已引起著名数学家华罗庚、王元的重视(华罗庚、王元,1981),而在我国生态学界 20 多年前熟悉此方程者寥寥无几;关肇直院士早在 1982 年就提出控制理论在生态学中应用的问题。钱学森、宋健院士在《工程控制论》下册也提到利用大系统解决生态环境问题。但在生态学界反应较迟。随着世界各国对生态学和生态环境重视,近 20 年生态控制研究取得长足进展。但是,某些极为有用的知识,诸如生态动力学、生态模造和生态控制知识,仅为少数专家所掌握。有些实践性强的知识,像生态动力预测和优化控制决策的经验,难以继承下来,对人类社会是一项损失。然而,生态控制的专家系统能将分散的专家知识采集、集成并存储下来,以科学的形式一代一代地传授下去,促进生态控制不断发展。

2. 形成生态控制的专家知识群体

生态控制学科交叉特点使形成具有不同知识结构的各学科专家的专家群体的必要性和紧迫性,为我们充分认识。而建立专家系统过程正是集中专家知识,形成专家知识群体过程。在此过程中,不仅收集各分支学科专家知识,还要对生态知识群体,尤其是那些经验类型的知识群体进行处理。使之系统化、条理化、科学化和形式化。比如湿地控制问题,由水文、鸟类、植被、土壤、系统生态等方面专家构成的群体知识的作用,远远胜过单纯的湿地地理专家,使湿地控制研究更科学,取得事半功倍效果。

3. 专门知识共享

涉及某类生态动力源的知识,往往是某一门类专家掌握得比较好,其他类专家差些。比如,未来 5d 是否会有影响植物的低温?要了解这一问题须有中期数值预报知识,然而,这种知识只是气象专家掌握较好。一般生态学家不知其预报原理,只能运用预报结果,难以做好防低温的生态控制,以致在确定保护植物免受低温措施时,并未将 5d 天气形势动态列入,必然影响控制效果。而生态控制专家系统建成,可使水文气象专家对生态动力源的认识,为各学科专家共享。其他行业专家的知识,对生态控制作用,也有类似情况。

4. 数学方法智能化

利用生态控制的专家系统,能够把包括数值方法在内的某些数学方法集成起来,使其为生态控制综合作用,否则由生态专家一一地去搞计算、模拟,浪费人力和时间。而专家系统却把他们解放出来,以更多的力量投入生态控制的分析、综合与决策中。

二、农业专家系统的生态控制内涵及改进方向

专家系统在生态控制方面的应用是一个主要的研究方向,所涉及的生态动力源和汇的范围极其广泛。在这里,只以发展比较早并应用普遍的农业专家系统中的有关生态问题,作简要论述。众所周知,农业科学所依赖的基础学科很多,像遗传、植物(动物)生理、昆虫学、植物(动物)病理学、农业物理、土壤肥料学、生物化学、生态学等,所以农业专家系统必然不同程度地涉及上述学科。鉴于本书的内容,我们只就其中涉及生态控制的内涵,加以论述并举例说明。

专家系统应用于农业,近 20 年国内外发展迅速,至 1996 年 6 月,国际上已有农业专

家系统近百个,广泛用于农作物生长、温室管理、牲畜环境控制、森林火灾控制、渔业生产等方面。近在 1998 年有用于葡萄生产的 GRAPEX,用于麦田的 NEPER 等系统。我国的农业专家系统研究始于 20 世纪 80 年代初,熊范纶等主持完成的科研成果 10 多年来,推广于 20 多个省市。

下面介绍“安徽江淮地区棉花生产管理专家系统”(熊范纶,1999)例子,分析其生态控制的内涵。该系统是由雄风 3.1 工具开发,在 Windows 95 平台上运行。综合该系统,其“移栽期的选定”和“追施蕾肥”,与生态控制关系最为密切。关于该例的优势,不拟多述,只就生态改进予以分析。先看移栽期的选定问题,据介绍“某用户是油菜茬或小麦预留行套栽,建议移栽期选在 5 月 15~25 日”。首先,不难看出,该移栽期的范围选得太宽,如果是在 5 月中旬之前 1 个月,比如 4 月 15 日左右粗选为该范围,尚可作为提早安排移栽的粗略参考时间,但一般应在育苗进行期间选择移栽期,这种移栽期大概应提前 5d 左右,并且所定范围不能超过 3d。否则,这样的选择就无异于农户一般的传统经验,失去建立相应专家系统的意义。在像移栽这种农事作业的生态控制来说,由于土壤肥力等生态动力源不会有大的变化,水文生态动力源通常能满足的情况下,未来的温度便成为气象生态动力源——或更确切地说是天气生态动力源——中最重要的生态动力因子,也是确定移栽期的关键。这种想法的确认时间,是早在 1965 年春召开农学家、气象学家、劳动模范座谈会上,此后,30 多年,无异议。但是,在 1979 年以前,由于 5d 左右的春季(或初夏)低温预报未过关,使播期确定成了难题。在欧洲数值天气中心的中期数值预报方法实行业务化后,能以模式输出图的形势指示中期天气预报并效果较好,可是具体要素预报只靠数值模式输出结果不行,要结合地方经验预报。依此想法作低温预报,使之与移栽期选择相结合,才会使涉及此问题的生态控制专家系统,不限于以前许多农业专家系统内容,而是强化生态控制在其中的作用。遗憾的是在国内外已有的近百个农业专家系统中,少有这样的生态控制的内核,以致其中关于农事活动的某些适应气象条件的控制决策,只是依据一般的气候规律,或只用基础的多年平均资料,使本来变动较大的天气生态动力因子未能体现,这种不充分考虑天气动态的农业专家系统是不完善的。此外,迄今国内外已有的数以百计的气象专家系统,少有考虑服务于生态控制者。然而,龚开煊等研制的“倒春寒”预报专家系统认为,低温阴雨天气往往是冷暖气团势力均衡,在华南形成静止锋并得以维持所致。据此抓住冷空气南下强度、路径,判断江南是否有锋生,分析高空温度锋区、水汽输送及本站湿度条件,应用系统软件,画出知识树,建成知识库,确定逻辑推理步骤,实践证明效果良好。将类似预报用于移栽确定等农事,进行优化生态控制,要充分考虑生态动力因子变化。还有曾志刚等研制的云南寒潮预报专家系统,也有类似的功能。

在农业专家系统中,另一个对天气敏感的问题是追肥。若掌握得准确,必须了解天气,正确运用降水这类预报专家系统,极为重要。我国已有不少省市建立了暴雨等预报专家系统,这些系统如纳入农业专家系统,即形成一种以天气生态动力因子为主的农业生态控制专家系统,对于其他行业,也是如此。

为创建生态控制专家系统的专门体系,需付出极大努力。因为现存的各种专家系统只能供生态参考。由于生态控制原理具有多学科交叉性,同时信息源广泛,建立生态控制知识库,初期很难十全十美,遇到一些失误,在所难免。重要的是要找出原因,不断改进使之渐臻完善。章基嘉院士 1990 年曾指出,气象专家系统的开发应用仍处在初级阶

段,存在着不少问题。这是气象专家对本行业专家系统的看法,其他行业,也有类似情况。生态控制专家系统,须参照有关学科专家系统,努力工作,以期在不久将来建立起较完善的生态控制专家系统。

三、海洋渔场生态预报与控制的专家系统方案

鱼类是海洋中重要生物,是人类重要的食品来源。鱼类在海洋中洄游受多种生态动力因子的影响。依生态动力方面的有关数据建立预报模式,再依其作预报是我们所期望的。但是海洋鱼类的洄游和中心渔场的形成,受许多因素制约。就以某大河三角洲附近的近海渔场来说,这种洄游和中心渔场的形成,据定性研究,主要决取于:海水温度(海面温度、深层海水温度),可视为物理性质的生态动力源;海水盐度和盐度梯度,可视为化学性质的生态动力源;入海大河的径流量,是水文生态动力源;海面的风向和风速,这可视为气象生态动力源。由于生态动力源和作为中心渔场的鱼类(生态动力汇)各自动态、因果关系及其变化十分复杂,以致尚无法比较客观地建立起确定性的微分方程模型和随机性的概率统计模型。但是,经过积累海况、渔况等多种生态动力源—汇方面的几十年数据,又有渔政管理机关、渔业公司的有关经验知识,由此可利用专家系统的某些方案制作中心渔场随时间推移变化趋势的预报。

下面,是采用范例推理(CBR)方案的推理过程简介。

假定海况是以周为计量单位加以研究的,是以 1 周作为周期。由所研究的那一周预报下一周中心渔场位置。

所采用的三个相似性度量方法是:

①基于渔场位置的相似

$$\text{sim1} = -\Sigma(\omega_i * \text{distance}(\text{pos}(\text{goal}) - \text{pos}(\text{source}))) / \Sigma\omega_i$$

②基于温度的相似

$$\text{sim2} = -\Sigma(\omega_i * \text{difference}(\text{temp}(\text{goal}) - \text{temp}(\text{source}))) / \Sigma\omega_i$$

③基于温度梯度相似

$$\text{sim3} = -\Sigma(\omega_i * \text{difference}(\text{delta}(\text{goal}) - \text{delta}(\text{source}))) / \Sigma\omega_i$$

其中 ω_i 是权重。该温度测试点与作为样本的中心渔场的距离 d_i 越近,权重就越大。在计算时,如果距离 d_i 为零,权重就为 1;如果 d_i 为海洋区域直径——最大距离 d_{\max} ,权重就为小于 1 的一个数 ω_0 ,用户可以根据推理结果进行修正;其余情形,用插值法来估计,即用如下公式

$$\omega_i = 1 - \frac{d_i(1 - \omega_0)}{d_{\max}} \tag{9-15}$$

该方案的范例主要有近邻法、归纳法、知识导引法或三者的结合。在本系统中困难之处在于海况(作为生态动力源)和渔况(作为生态动力汇)信息以及它们之间的时间、空间相关关系。为了清晰起见,作如下形式上处理。

设 C_{t_1} 为时刻 t_1 的海况,它是渔场发生的条件(条件属性); G_{t_1} 为在时刻 t_1 渔场的位置、规模和产量(决策属性);时刻 t_1 实例

$$I_{t_1} = (C_{t_1}, G_{t_1}) \tag{9-16}$$

组成一个高维向量。而

$$I_{t_1 \sim t_n} = \{I_{t_1}, I_{t_2}, \dots, I_{t_n}\} \\ = \{(C_{t_1}, G_{t_1}), (C_{t_2}, G_{t_2}), \dots, (C_{t_n}, G_{t_n})\} \quad (9-17)$$

构成一个时间连续的实例序列, t_2 是 t_1 的下一个时刻(周), t_n 是 t_1 的下 $n-1$ 个时刻(周)。 $\Delta G_t = G_{t_{i+1}} - G_{t_i}$ 反映渔场变化。

设 $\Gamma_{s_1' \sim s_k'}, \Gamma_{t_1' \sim t_k'}$ 是 $I_{s_1 \sim s_m}, I_{t_1 \sim t_m}$ 的两个长度为 k 的全序子集。 $\Gamma_{s_1' \sim s_k'} \subseteq I_{s_1 \sim s_m}$, $\Gamma_{t_1' \sim t_k'} \subseteq I_{t_1 \sim t_m}$, $\text{sim}(\cdot)$ 是相似度量函数。如果 $\Gamma_{s_1' \sim s_k'} \cong \Gamma_{t_1' \sim t_k'}$, 则称 $I_{s_1 \sim s_m}, I_{t_1 \sim t_n}$ 是 $k-\delta$ 完全相似的(其中 δ 是 0,1 间的阈值)。

设 $C'_{s_1' \sim s_k'}, C'_{t_1' \sim t_k'}$ 是条件序列子集, 如果 $C'_{s_1' \sim s_k'} \cong C'_{t_1' \sim t_k'}$, 则称 $I_{s_1 \sim s_m}, I_{t_1 \sim t_n}$ 是 $k-\delta$ 条件相似。

设 $I_{u \sim cur} = \{I_u, I_{u+v} - I_{cur}\}$ 表示当时渔场从当前时刻长度为 $cur - u + 1$ 的序列, 则

$$I_{u \sim cur+1} = \{I_u, I_{u+v}, \dots, I_{cur}, I_{cur+1}\} \\ = \{I_{u \sim cur}, I_{cur+1}\}$$

表示当前渔场从时刻 u 到下一时刻 $u+1$ 长度为 $cur - u + 2$ 的发展过程, 其中

$$I_{cur+1} = (C_{cur+1}, G_{cur+1})$$

式中的 C_{cur+1} 可通过气象条件分析(最好参照欧洲中期天气预报中心模式输出图)得到。而 G_{cur+1} 表示下周渔场, 即预报对象。

设 $\Gamma_{u' \sim u'_k}$ 为 $I_{u \sim cur+1}$ 的包含 I_{cur}, I_{cur+1} 全序子集, 由此找出海况相似。这样可得

$$G_{cur+1} = C_{u'k} \cong G_{v,k}$$

于是, 根据 $G_{v,k}$, 可以得出 G_{cur+1} 的位置。

参 考 文 献

- 于系民. 1994. 作物气候评价的几种客观方法. 北京: 气象出版社.
- 气象专家系统技术组. 1990. 气象专家系统文集. 北京: 气象出版社.
- 史忠植. 2000. 智能组织与应用. 北京: 科学出版社.
- 史忠植. 2002. 知识发现. 北京: 清华大学出版社.
- 华罗庚、王元. 1978. 数论在近似分析中的应用. 北京: 科学出版社.
- 关肇直文集编辑小组. 1986. 关肇直文集. 北京: 科学出版社.
- 约翰·马静能等. 2000. 中国鸟类野外手册. 长沙: 湖南教育出版社.
- 宋 健. 1985. 工程控制论(大百科全书词条). 系统工程的理论与实践, 2:1~4.
- 张成岗等. 2002. 生物信息学方法与实践. 北京: 科学出版社.
- 易克初、田 斌、傅 强. 2000. 语言信号处理. 北京: 国防工业出版社.
- 梁平德等. 1992. 模式识别及其在气象中的应用. 北京: 气象出版社.
- 傅京孙主编、程民德、石青云、戴汝为、边肇祺译. 1990. 模式识别应用. 北京: 北京大学出版社.
- 廉振民. 2001. 昆虫鸣声分类研究. 北京: 科学出版社.
- 熊范纶. 1999. 农业专家系统及开发工具. 北京: 清华大学出版社.
- 戴汝为. 2002. 人工智能. 北京: 化学工业出版社.
- 戴汝为. 1994. 形象(直感)思维与人机结合的模式识别. 信息与控制, 23:76~79.
- 德波信雄. 1992. 画像八力による植物の生体情報. 農業機械學會關西支部誌, 54:37~41.

- Burshin, D. 1996. Robust parametric modeling of duration in Hidden Markov Models. *IEEE Trans. On Speech & Audio Processing*, **4**:240~242.
- Heinemann, P. H. *et al.* 1995. Machine vision for color inspection of potato and apples. *ASAE*, **38**:1555~1561.
- Nilsson, N. J. 1999. *Artificial Intelligence; A New Synthesis*. Beijing: Machine Industrial Press.
- Park, B. *et al.* 1996. Character multispectral image of tumorous wholesome poultry carcasses. *ASAE*, **39**:1933~1941.
- Pynadath, D. V. and Wellman. M. P. 1998. Generalized queries on probabilistic context-free grammars. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **20**:65~77.
- Theodoridis, S. and Koutroumbas, K. 1999. *Pattern Recognition*. Boston: Academic Press.
- Yu Ximin. 1986. Some applications of pattern recognition to agroclimatic analyses and assessments. *International Scientific Computing and Automation Conference*, Nov. 5~7. Atlantic, USA.
- Yu Ximin. 1992. Computer recognition for cell characteristics of some agrometeorological damage (rice, maize, soybean and sorghum). *Proceedings of the First Conference on Agroclimatic Damages*, Mar. 16~19. Shenyang, China.
- Балонин, Н. А., Тусев С. А. и Попов, О. С. 2002. *Элементы Искусственного Интеллекта в Адаптивном Управлении*. Москва: Наука.

第十章 生态经济控制与可持续发展

关于生态、经济关系,我们在《生态动力学》一书中已有论述。生态经济控制乃是在生态与经济关系的动态研究基础上,为使生态环境优化进而保障经济发展的后劲,所采取的人工掌舵措施,也是充分发挥人工生态动力源作用的优化手段。生态与经济优化的协调是实现可持续发展的必须措施。这方面的控制原理很多,并涉及生态学的诸多方面。这一章重点论述的是能值分析、环境经济、微分方程及随机控制在农业、林业、牧业、湿地及城市环境生态经济控制中应用的原理、方法和例子,侧重于数学方法的应用。

第一节 能值利用、环境负荷与生态经济的可持续发展

可持续发展,越来越深入人心。2002年在南非又一次举行了有许多国家元首或政府首脑出席的环发大会。说明可持续发展已纳入政府和政府间活动的重要议程。

在可持续发展的研究中,生态控制占有重要地位,而其定量分析更是从原理上研究可持续发展,尤其是一个国家级规模的可持续发展的科学依据。而在这样的研究中,国际著名生态学家 H.T.Odum(1988,1991)曾指出,最大能值流是 Lotka 最大功率原理(Lotka's maximum power principle)的新的表述方式:使能值流最大并增强生产能力的自组织系统是可持续的,而其他系统都为能较好地增强其生产基础的物质所取代。

为研究可持续发展和能值的应用,人们用多种方法作经济与自然系统的能值分析。其中国家的研究是 Vigiati 等(1994)用热力,经济价值指标对意大利所作的评估,并以这些指标同其他发达国家、发展中国家的指标作了比较。

一、科学基础

由于人口膨胀,人类考虑其经济决策的长期环境后果,就显得越来越重要了。

搞经济的目标是取得经济效益,其现实决策是围绕市场转。而公共政策的决策,必需以与全球动态平衡一致的一个价值系统为基础。在这种分析中所用的新的公共政策价值系统(public policy value system)即能值分析,承认个体短期的利益与长期宏观利益之间的差异,并能定量地确定社会、环境宏观尺度上的价值。它能够公平地评价自然资源,野生生命和产业生产活动,用作确定他们各自对整体利益和长期可持续性的相对重要性及其贡献的一种工具。

能值系统的基础是系统结构和最优化概念,是基于数学生态奠基人 Lotka(1922,1945)、系统论创始人 Bertalanffy(1968)和著名系统生态学家 Odum(1983)的工作。

在 20 世纪 80 年代中后期,由 Odum 等提出的太阳能值转换率(solar transformity)和太阳能值(solar emergy)概念是系统分析方法学的基础,是以人类社会和大自然取得相对有效平衡为目的来确定资源利用、环境影响、国家和国际政策的一个量数。

能值(emergy)的定义是:启动生产、社会公用事业(或直接地或间接地)所需求的能量的总值。转换率的定义是:每单位的生产或社会公用事业所需求的能值。当所用总能

量是以煤(或煤的当量,如在能源分析中常用的那样)的形式来表达的时候,我们可以说煤的能值和煤的转换率。在论及太阳能的时候,我们可说太阳能和太阳能值转换率。当两种初始自然过程在生产中起同种作用的时候,它们的太阳能值转换率就被认为是一样的。用这一类比能评价具有不同来源的初始能流(像太阳能、地热能或潮的重力能)之间的关系。

这样,我们有必要述及太阳(当量)能值,并以太阳能值焦耳(sej)为单位计量。我们也将论及太阳(当量)能值转换率,并以每焦耳生产量的太阳能值焦耳($\text{sej} \cdot \text{J}^{-1}$)或每克生产量的太阳能值焦耳($\text{sej} \cdot \text{g}^{-1}$)为单位计量。为叙述简便起见,这里所说的能值意指太阳当量能值,所说的转换率意指太阳当量能值转换率。转换率可以从已知的处于稳定状态的自然过程和人工过程的输入分析和输出分析估计出来。

由 Odum 等提出并在能值分析中一直被使用的上述概念与定义,是研究生态经济可持续发展的基础之一,是迄今为止把能值联系起来的一种定量的工具。从生态动力学理论来说,它们能把生态动力源的能源概念分级联系起来,是衡量原本用不同计量单位表示的各种各级生态动力源的初步标准也体现了太阳作为一级暨基础生态动力源并可作用于其他级别生态动力源的本质意义。所以,它们在宏观和微观可持续发展中均应有较好的应用价值。

二、国家级能值分析之例:意大利的主要结果

意大利文化渊远流长,城市化起步被认为是公元前 735 年的古罗马,进入当代,全国城市很多。Vlgiati 指出:城市化的发展是靠矿物资源和其他能源支撑的,能源起初来自城市周边地区,继后则源于被征服的国家。

意大利的人口近三四十年来增长缓慢,有植被的土地为可用土地面积的 56%,森林覆盖率为 22.4%。全国工业增长和农业生产之工业化的发展,导致一系列环境问题。

1. 贸易平衡问题

如 Vlgiati 等经计算后已经简要指出的那样,贸易(即意大利与欠发达国家之间的能量交换)是不平衡的,其主要原因是:

①意大利进口的能值超过其出口,因此避免了本土资源(但这些资源大都用于家庭住宅)的持续开采;对于意大利经济有益的资源、对世界经济的稳定所起的作用,不能等而论,因为对其他国家来说,可用性较小,是资源实际上单向流动的一种显而易见的后果。

②由于意大利的能值对美元的比率低,所以能值从其他国家进口时,对意大利都是不利的。

2. 可用能值的有效利用

副产品、废物、废料等没有充分用于意大利的经济反馈,这是很常见的事。资源利用的有效性还不是最优的。因此,为开发同其他国家比较属于等量的环境资源,更多的不可更新的资源是需要的,这正如很高值的环境荷载率所指出的那样。

对环境的负作用是显著的;这种长期作用的持续进程,对于作为国家发展条件的环境基础,会起到大的破坏作用。在意大利北部(那里工业高度发展,人口密集),大量能值利用,产生许多有机残留物和工业废水废物,流入海中,使鱼类受到污染,使旅游事业遭受损失,同样个人财产也受损失。

3. 对意大利公共政策的建议

具体生产单位和生产管理者,对生态问题往往缺乏远见,其最感兴趣的是短期利益——快速开发自然资源而获利,而不是长远的环境质量,所以对能值分析也不会感兴趣。能值分析的结果的主要用户是公共政策的决策者。他们在规划国家可持续发展道路以及自然资源管理决策中,考虑能值分析。在开发环境资源的时候,贸易与农业产业生产、贮藏资源的可持续开发、外国资源引进、局地尺度开发竞争、不可更新能值利用等方面的能值平衡的研究和计算,都是有用的。外国能值的引用,是有长远意义的,这是一切可持续发展与财富增长的基础。

三、其他方面的研究与应用情况

能值分析提出以来,在涉及能源的许多领域,其中有许多涉及并主要用于可持续发展和生态领域。下面分地区介绍一些例子。

1. 欧洲

Donati 等研究了意大利农用杀虫剂的环境问题。在瑞典,Nilsson 等编了一部《能值分析——架设在人类经济学与自然界之间的一座生物物理桥梁》的皇家农业科学院报告文集,其中有 Doherty 等著《瑞典能值分析述评》一文。Pillet 用能值方法分析了自然资源优势与公用事业价值问题。Vigiati 等分析了意大利农业系统的能值问题,发表在 Bonati 等主编的由阿姆斯特丹埃尔塞维尔公司出版的文集《生态物理化学趋势》之中。

2. 美洲

Doherty 研究了巴布亚新几内亚的能值分析和公共政策问题,发表在佛罗里达大学湿地中心的研究报告文集中。Odum 研究了“能值与生物地球化学循环”和“能值与公共政策”,并构成环境工程科学的文献被收录。Odum 又针对厄瓜多尔发展河虾问题作了能值分析。

3. 亚洲

Brown 等针对泰国和湄公河建设问题作了能值分析。我国 Huang 等研究了台湾能值分析与公共政策和台湾生态经济系统进化与展望。

能值分析的应用是很广泛的。仅从以上举出的情况来看,不仅有宏观的全国性大范围生态经济的能值分析(如意大利、泰国、巴布亚新几内亚),一个省的能值分析(如我国台湾),也有一个河流域(如湄公河)的相应分析。有全社会性的,也有针对某一具体问题(如河虾发展,大坝设计)的。可见,从生态动力源角度,关系到生物、非生物;从产业方面,涉及农业、工业和市场贸易等多方面。

由于该方法和相关概念,提出和运用时间尚短,有待今后改进,并加强理论研究。像我国这样的地大物博、人口众多的发展中国家,情况更为复杂,一次性地完善全国能值分析,是不太容易的。但我们相信,我国有多年重视资源调查利用的传统并且生态等领域的科技人才济济,只要引起社会重视,像 20 世纪 80 年代搞全国性区划那样,组织好能值分析,必然对优化控制生态经济环境,保障可持续发展,做出应有贡献。

四、微观可持续发展的生态经济——能值指标及其应用

以往对于可持续发展的微观问题,往往作定性控制,而控制的目标——经济效益、生态效益是研究者所追求的,但是由于参加决策咨询的研究者,经历、学识和考虑问题的出

发点不同,所提出的意见很难有说服力。总是各执己见,僵持不下。尽管用 Nash 均衡等方法可以作出某种综合,但原始依据定性成分较大,对可持续发展的认识水平和建议说服力有限,针对性也不强。在近年,一些研究者在 Odum 提出的能值分析方法基础上,作了不少研究,提出一些指标。我们感到这是从生态经济出发,对可持续性研究的一个好的开头,值得提倡,应用并进一步研讨。下面就结合 Panzieri 给出的一个例子加以说明。

在我国,大约 10~20 a 前,曾作过大量的农业资源调查与区划研究工作,这些资料加上近 10 年形成的大量资料如果用以下能值方法作分析,对于优化作物结构,保障局地农业可持续,无疑会有现实意义。尤其是在过去区划中,并没有十分注意可持续发展问题,而在国际上近 10 年召开的两次可持续发展会(第二次于 2002 年在南非比勒陀利亚举行,朱镕基总理代表我国出席)对于促进这类研究应用将有价值,反过来,研究成果将更好地为政府服务。

1. 根瘤菌科植物 *brad-hyrisobium japonicum* 共生现象,在大豆栽培可持续性中的重要性

对于大豆生产力来说,氮通常是限制因子,*brad-hyrisobium* 的活动,从经济和环境观点来说,都是极其重要的。

Panzieri 研究的目的是定量地指出:化学物质输入量的减少(即氮肥减少,能够减轻农业对环境的影响,提高农业可持续发展能力),利用生物技术(比如将细菌引进土壤之中),以便创造人为胁迫较轻的环境以增加作物产量。

能值分析(emergy analysis)是 Odum 提出的用于评价不同生态过程、经济过程的可持续性的热力学方法。

对于一个过程或流动来说,太阳能当量——启动该过程式流动所必须(直接或间接)的生物圈之基础能量——定义为能值。向该系统的一切输入(环境的和经济的)都是以太阳能的单位(即太阳能值焦耳 solar emergy joule, sej)为单位来评价使系统得以持续的环境所做的功。能值分析,可以在研究、测量自然作用和人为作用的前提下,对系统作出全面评价。用该方法便于对不同类型的输入加以比较(Odum, 1996)。进一步来说,用能值近似,可以把向同一系统的一切不同的输入全部化为同一公共分母(太阳能),以资对不同类型的输入进行比较,这无疑是能值方法的一大优势。

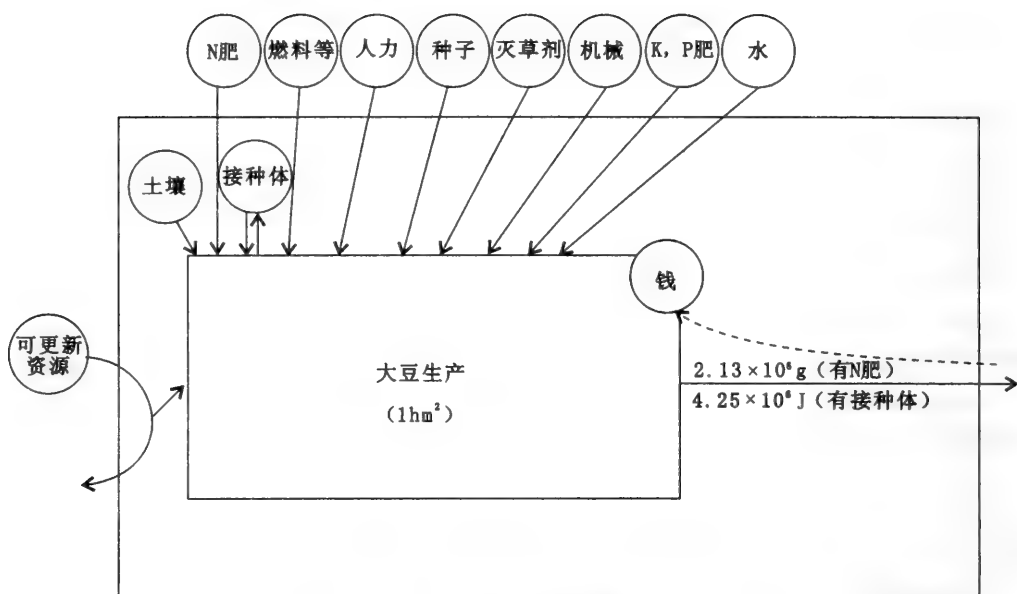
2. 应用实例;根瘤菌科植物共生与大豆可持续发展

从大豆的生理生化特性可知,在这一研究中,作为主要营养生态动力源的氮的需求是问题的焦点。

能值分析的第一步工作是形成系统的能值图解,以便清楚地认识系统及其分量。图 10-1 是 Panzieri 等(2000)根据 Odum(1983)给出的条件绘出的意大利 Tuscany 的一种大豆作物能值系统的图解。

能值总量(total emergy)是来自各独立输入的一切贡献的总和。它实质上是有贡献于大豆生产的一切生态动力源的综合作用的表示。从生态动力源的分级可知,对于大豆生产来说,不可缺少的气象生态动力因子像降水、湿度、风等二级生态动力源,全都是太阳辐射——一级生态动力源——所支配的,因为太阳辐射能是地球大气活动的最基本、最原始的能量源泉。

太阳能,太阳传输,与从能值评价表计算出来的其他指标、比率一起,被用于评价系统的效率 and 环境影响,从而为长期可持续发展决策提出定量依据较充分的合理建议,为作物栽培乃至生态农业发展提供科学基础,这正是生态控制原理服务于可持续发展的有



施 N 肥与利用接种体是二者择一的选择

图 10-1 大豆能量系统图解(意大利 Tuscany)

效途径之一。所用指标和比率中,有一些考虑能值流的可更新性。其中最重要的是环境荷载率(environmental loading ratio 即 ELR)和能值产量率(emergy yield ratio 即 EYR)(Odum,1996)。ELR 是来自买入的、不可更新的局地输入对来自环境自由输入的比率。它的值越小,说明生态系统环境的胁迫和压力就越小。EYR 是输出能值除以输入来自外界反馈系统的那些能值所得的商。它是一个系统利用局地资源(通过外界投资)能力的一个量数;它的值越大,这种能力就越强。

ELR 和 EYR 都是无量纲指标,而导出的另一个比率旨在评价环境胁迫,那就是能值密度(empower density),它是支持系统所必不可少的能值总量除以地面面积所得的商。该值越小,对环境的压力越大。

用于系统评价的另一指标是近年提出的可持续指标 SI(Vigliati *et al.*, 1998),它是 EYR 除以 ELR 所得的商。该指标同时说明系统的生产能力和它对环境影响。对于同一输出过程来说,SI 越大,经济-生态一致性越好。

结果表明(图 10-1):根瘤菌接种体与大豆作物之间共生现象是用方向相反的两个箭头表示的,即从接种体到大豆,从大豆到接种体。接种体的评价采用如下方法:能值对钱的比率乘以价格。

由于产品销售,自外界到系统的钱流,用虚线绘出。对于能值总值,太阳能转换率以及大豆两种栽培方式的其他可持续发展指标,是可以相互比较的。结果指出:按 ELR,无接种体大豆为 1.22,有接种体大豆为 0.93,说明后者对生态环境压力大;按 EYR,前者为 1.98,后者为 2.32,说明后者利用局地资源能力强;按 SI,前者为 1.62,后者为 2.49,说明后者经济-生态一致性好。根据以上三个指标,可考虑选择栽培方式的利弊,如果就此选择“共生”,则对资源利用能力强,经济-生态一致性好,这是“有利”的方面,但对环境压力大,这是“弊”的方面。与其他作物,可作类似比较:①按 ELR:共生大豆 0.93,玉米 5.63,向日葵 27.88,谷子 3.02,饲料作物 1.45,说明向日葵对生态环境压力最小;②按

EYR:以上各作物依次为 2.32,1.19,1.04,1.33,1.76,说明共生大豆对局地资源利用的能力最强;③按 SI:依次为 2.49,0.21,0.04,0.44,1.21,说明共生大豆经济-生态一致性最好。从中可见,栽培作物种类方式的利弊。比如,从全局认识,共生大豆,利的方面多,但存在对环境压力大之弊,如果要采用这种可持续发展措施,必须注意,以改善人工生态动力源方法,尽量人为地减轻环境压力,才能实现可持续发展。当然,如果几个指标都一致,那就更好了。但是,由于计算的定量方法毕竟是由人来设计的,所以,不能说一切指标都利于某种作物之某种栽培方式,就抱着乐观态度而掉以轻心,那反而不利于可持续发展。真正的可行方案,必须考虑综合集成。当然,在其中,可持续指标值会起到其他方法不能代替的关键作用。

五、栽培方式与农业可持续发展

为了评价复杂系统(比如农作物栽培系统)的环境可持续性,必须采用一种系统的方法,这种方法考虑启动系统过程的一切质量流和能量流,而这些质量流、能量流是相互交错的,振动的,并且是相互影响的。用 Odum 提出的方法论,Panzieri 等(2002)用不同的栽培方法(传统的,生物学的和综合性的),对三种樱桃作比较,以便了解农业系统应当如何发展才能使环境的效果达到最佳。结果表明:用大量的非自然输入的传统方法显示出不可持续性,而自然和收益输入的方法是最佳的。浮现方法是评价可持续性的一种有利的方法论。从樱桃作物研究所取得的指标方法,可以外推到其他类型的栽培中去。

让我们论述栽培方式与农业系统的可持续发展。

从生态动力经济学的观点来看,为了发展农业生产,人们一方面必须用优化的生态控制手段充分发挥生态动力源的正面效应,促进现实的农业生产力的发展,使农业产品高产、优质、高效,满足社会现实需求;另一方面,也要保持农业的储备,有利于农业的长期可持续发展。为此,需用适当的分析方法来处理这样的问题。Odum 提出的能值分析(emergy analysis)——一种热力-生态方法论——是估价过程有效性、评价长期可持续性的有力工具。对农业可持续发展有重要影响的因素很多。不同栽培方法对农业系统可持续性影响,是引人注目的。

1. 方法

(1)能值分析与可持续发展

传统的能量和经济分析,往往只考虑能够依据能量或资金加以估计的那些输入(见《生态动力学》一书第 113 页图)。而且市场价格并非总是与资源对经济作出的贡献成正比的(Odum,1996),而能值分析,通过计算环境在驱动某一过程中所起的作用,将环境向系统的支出系统化了。

能值评价系统,在与太阳能当量相同的基础上,既测量在生产活动、服务过程中自然界所起的作用,也测量人在其中的作用,这就为寻求人类活动、自然作用的可持续策略与模式提供了一种定量的方法。这种热力学方法用途是广泛的,大量的系统(像生态系统、生产过程等)可以用这种方法进行分析,以评价作为一级生态动力源的地球能量基础的输入和输出。这样的方法论可用于农业系统。在农业系统中,环境输入(比如土壤肥力,气候条件)显然是一些限制因子,所以这样的应用,对于表达这种技术,对于求得未来可持续发展的数量指标来说似乎是特别适宜的。

(2)能值分析和可持续指标

能值分析的基础是:向通用单位即太阳能——一切生物过程的初始能源,即生态动力学中所说的基础生态动力源——的所有过程输入是守恒的。对于给定的过程流动来说,(太阳的)能值的定义是:直接或间接驱动该过程或流动所必须的太阳能,能值的计量单位是太阳能值焦耳(solar emergy joules)即 sej。能值构成一种记忆,记忆为维持某一过程,为取得某种产品,自环境而获得的功(以太阳能为基础)。(太阳能)转化能力(transformity)是间接生产能量的能值,其表达单位是 $\text{sej} \cdot \text{J}^{-1}$ 。它是某一过程或某种产品质量的量数。它的数值越大,产生那种产品所需要的太阳能量就越多,它在宇宙总量中所占据的位置就越高。但是,转化能力也是过程有效性(效率)的一个指标。对于等价过程(有相同的输出)来说,转化能力越低,产生那个输出的过程就越有效。

为了更好地认识所研究的系统,估计生产环境的影响及其可持续性,另有几个关系到能值的指标是有用的。这些指标中的每一个指标都聚焦于可持续性的某一方面,它们提供了具有竞争作用的信息。

能值收获率(emergy yield ratio)是用经济上接收的过程的那些输入的能值,除能值产量所得的商。这一指标总是大于1的,它的数值越大,投入的每单位能值所得到的回收也就越大。对于等价过程来说,这个比率是竞争性的一个量数。

环境荷载率(environmental loading ratio)是用可更新的环境能值输入除不可更新的环境输入而得到的商。在不可更新的输入中,无论是经济上的输入或者是固有的输入(由无损失的环境给出)都加以考虑。环境荷载率越高,经济系统对当地自然环境的压力就越大,这意味着利用能值的较高技术和(或)较高的环境胁迫。

能值密度(emergy density)是用系统面积除为获得一定产量所须的总能值所得的商。它是一个系统或一个过程内部能值的空间浓度的一个量数,是环境胁迫的一个指标。它的值越高,被用于单位面积的输入能值就越大,对环境的压力就越大。

2. 实例分析

图10-1是参考Odum所著《系统生态学》一书中提出能量符号表达的关于大豆而作出的能量系统图解。关于另外两种作物也有类似图解。

对于采用不同栽培方式的作物进行比较。采用第一种栽培方式即按传统栽培方式进行管理,称之为第一种作物。系用化学合成物作为肥料对土壤施肥,并用化学农药防治虫害。另一种作物的管理全用天然物资(施肥全用有机的厩肥,用生物物质作为杀虫剂,或生物防治)。第三种作物采用化学与生物合成物综合利用的方式。我们将分别称上述方式为传统方式、生物方式和综合方式。

3. 结 果

根据前述原理和实例资料进行具体计算时,系统具体栽培方式的输入,有所不同。对于传统方式,输入为:日光、雨量、风、土地循环,表土损失,氮肥,磷肥,钾肥、杀虫剂、柴油和润滑剂、人工、农机;对于生物方式,输入为:日光,雨量、风、土地循环、表土损失、有机厩肥、杀虫剂、柴油和润滑剂,人工、农机;对于综合方式,输入为:日光、雨量、风、土地循环,表土损失、有机厩肥、氮肥、磷肥、钾肥、杀虫剂、抗孢子剂(anticryptogamics)、柴油和润滑剂、人工、农业、灌溉水。由此及相应数据可见,三种栽培方式所用肥料、化学药剂、有机厩肥、燃料、农机以及人工,是不同的。生物系统,用农机较少,因而消耗燃料较少,能值输入大约是传统方式的1/13和1/15,比综合方式的相应值小得多。从能值项来说,按传统方式,化学肥料(氮肥、磷肥和钾肥)的总输入,与按生物方式以有机厩肥作为肥料

的输入,量值是相当的。这就意味着:在传统方式中所用的不可更新的,有潜在毒性的输入(像化学肥料,这样的一些输入),可以被另外种类的能值源——其特点是,部分可更新,从生物意义来说,总体上是可降解的——所代替。

采用综合方法,自化学肥料、有机肥料的能值总输入是较低的;但是,自杀虫剂的能值总收入,是比用其他方法高的;抗孢子处理也是需要的。按能值,综合方法投入的人力比生物方法的3倍多,比传统方法的2倍多。

为启动这些过程所需的总能值,以生物情形为最小,这表明:该系统对环境的压力是十分低的。如果分析包括畜牧生产在内的一个较大的系统,比如一个农场,那么有机厩肥就成为一种反馈,而不应用把它看作一种外界输入。一般说来,使系统能值损失(支出)减小的那些反馈,改进了系统的可持续性。

为了评价三种栽培方法的可持续性,也必须考虑所形成的生产过程。就作物产量来说,用生物栽培方式的最差,而用综合栽培方式的最好。传统的系统,似乎较低,特别是在考虑一切非自然输入的情形下。

对传输能力作比较,从能值的观点来看,最有效的系统是综合系统。能值收获率显示是如何用生物栽培方式最有效地利用环境资源的。进一步来说,环境荷载率,对于生物系统来说是低得多的,这是发展这种栽培方式的又一原因。即使生物方式,平衡地应用了可更新和不可更新的输入,显示出它所受环境影响最小,它的最低生产力也使它的经济竞争能力较差。从有效性的观点来看,综合系统的结果是最好的,如果我们考虑到它的环境影响也是有限的,那么综合系统就是最佳的。此外,在这种情形下,人力是对系统的主要输入,这在经济上是合算的。这样,综合方法似乎是生物方法之后的一种好的模式,考虑到“传统方式有高值的环境压力并且有较低生产力”这一事实,尤其是这样。

总之,评价复杂系统可持续性的一种热力学方法论,在这里已被用于估计:选择性农业实践对生产有效性和环境完整性的影响。对于环境 and 经济数值的能值估价为合理地确定未来应遵循的发展方向——在生物圈限制的条件下,发展生产力——提供重要的结果。

该研究显示:对于长期的可持续性来说,目前尚广泛应用的传统栽培方式,应当加以修正。实际上,传统方式对生产的影响太大了,以致最终促成使生产不可持续的地步。研究指出:应加强生物输入的引进,减少化学及其他非天然合成物的应用,以使农业资源被充分利用,保障产品的数量、质量,取得大的经济效益,并且使环境有益于可持续发展。

六、能值与湿地开发的生态控制

关于湿地生态系统的意义,《生态动力学》一书的第十五章指出:“利用保护湿地生态系统对繁荣经济,改善生态环境,保护自然具有重要意义。”为达到上述目的,优化湿地生态建设,合理控制面积比例,是生态控制的一项重要措施。比如,某湿地、拟建水禽湖和鱼塘,面积比例为多少最为合适呢?在未运用能值分析方法之前,或由主观分析,定性地确定比例,或对水禽及鱼类专家意见‘二一商作五’,或用 Delphi 调查进行决策综合。上述曾用的方法,不能说不对,但那只是比较主观的定性认识的产物。在当今,有了能值分析手段,当可用于该问题之中。下面是蓝盛芳等(2002)书中给出的人工湿地建设水禽湖与鱼塘比例的能值分析综合过程,这样的计算也可用于生态建设的许多其他方面。

关于盐城自然保护区的有关能值指标,已经由分析得出,如表 10-1 所示。

表 10-1 盐城自然保护区水禽湖和鱼塘能值指标

项 目	表达式	能 值	
		水 禽 湖	鱼 塘
可更新资源能值流入	E_{mR}	$1.88 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$7.74 \times 10^{16} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
不可更新资源能值消耗	E_{mN}	$8.80 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$3.65 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
经济反馈投入	E_{mF}	$9.33 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$1.24 \times 10^{18} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
经济收入	E_{mI}	$8.61 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$1.48 \times 10^{18} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
非交换能值产出	E_{mEY}	$5.49 \times 10^{18} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	0
总能值产出	E_{mY}	$6.35 \times 10^{18} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$1.48 \times 10^{18} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
能值产出比率	$r_{yr} = E_{mY}/E_{mF}$	6.81	1.19
净经济效益	$E_{mNP} = E_{mI} - E_{mF}$	$-0.72 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$2.40 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
系统储存能值变化	$E_{mBec} = E_{mEY} - E_{mN}$	$4.61 \times 10^{18} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$	$-3.65 \times 10^{17} \text{ sej} \cdot \text{a}^{-1}$
净经济收益	$E_{mNP'}$	$-3.00 \times 10^{14} \text{ sej} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$	$2.4 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$
系统基础能值变化	$E_{mBEC'}$	$1.92 \times 10^{16} \text{ sej} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$	$-3.65 \times 10^{15} \text{ sej} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$

假设应建 x 水禽湖和 y 鱼塘(单位: hm^2), 其比率为

$$t = \frac{x}{y}$$

则有

$$\begin{cases} (x+y)E_{mBEC'} = 1.92 \times 10^{16}x - 3.65 \times 10^{15}y & (10-1) \\ (x+y)E_{mNP'} = -3.00 \times 10^{14}x + 2.4 \times 10^{15}y & (10-2) \end{cases}$$

用 t 代替 x/y , 即式(10-1)和式(10-2)两边都除以 y , 则得:

$$\begin{cases} (1+t)E_{mBEC'} = 1.92 \times 10^{16}t - 3.65 \times 10^{15} & (10-3) \\ (1+t)E_{mNP'} = -3.00 \times 10^{14}t + 2.4 \times 10^{15} & (10-4) \end{cases}$$

由式(10-3)计算出 t , 代入式(10-4)得:

$$0.118E_{mBEC'} + E_{mNP'} = 1.97 \times 10^{15} \quad (10-5)$$

在线性约束 $E_{mBEC'} > 0$ 和 $E_{mNP'} > 0$ 条件下, 绘出关系图(图 10-2)。由方程(10-1)和方程(10-2)得

$$8.00 > t > 0.19$$

并且, 有:

- ① $t = 0.19$ 时, $(E_{mBEC'} + E_{mNP'})_{\max} = 2.13 \times 10^2 \text{ 元} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$
- ② $t = 8.00$ 时, $(E_{mBEC'} + E_{mNP'})_{\max} = 1.80 \times 10^3 \text{ 元} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$
- ③ $t = 0.31$ 时, $(E_{mBEC'} + E_{mNP'})_{\max} = 3.80 \times 10^2 \text{ 元} \cdot (\text{a} \cdot \text{hm}^2)^{-1}$

综上, $t = 0.31$ 时, 生态经济效益为最大, 故水禽湖对鱼塘面积比例为 0.31。该种关系示于图 10-1。

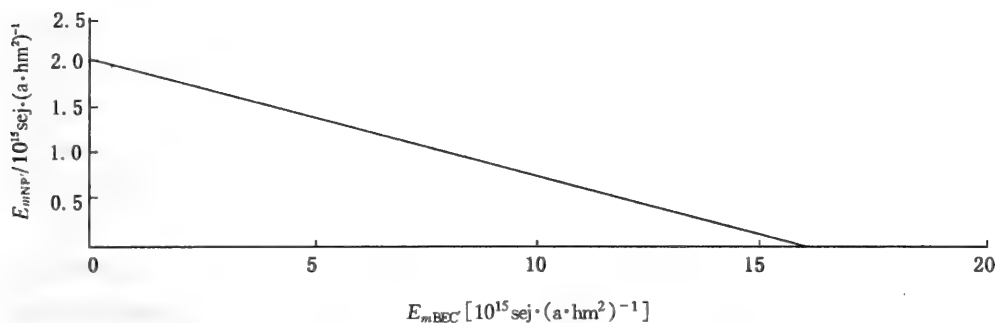


图 10-2 E_{mBEC} 与 E_{mNP} 关系图

第二节 城市生态环境及其可持续发展的生态经济控制

本节在概述城市生态及其控制意义基础上,讲述决策主要手段,重点在于森林绿地建设的优化控制问题。

一、问题的提出和意义

在中外历史上,城市的形成和发展,历史悠久。从地理学、社会学等学科出发来研究城市的成果,也都有相当长的时间。而从生态学出发来研究城市,至早也只是在现代工业发展起来之后,这当然主要是由于工业发展及生活需要使城市大气、土壤等生态动力源朝着不利于人这一生态动力汇的方向转化。研究者及城市居民受到变得越来越差的城市环境之负面影响直至深受其害,才猛醒过来,把城市环境恶化当作一个问题。这实质上,标志着城市居民生态意识的迅速提高。但是,直到 1978 年之前,由于种种原因,我国广大城市居民甚至涉及生物学的农学、医学工作者,大多数不知道生态这一名词是什么意思,甚至把它同生理、生化混为一谈,因为直到上世纪 60 年代末,我国农科、医科大学尚未开生态课。虽然如此,城市生态环境,在多年以前,并不因为公众对其认识不深而停止其演化。与此相应,改善和促进城市生态优化的活动,也在持续着,即人们为控制城市环境的恶化,在设计并实施某些工程,如建设公园绿地等。只是那时没有从生态和可持续发展的高度来认识。客观经济条件的限制也不允许生态建设规模过快发展。以致当时只用感性认识的定性设计,不用运筹学、控制论等,也能完成当时条件下的研究与实际工作。

1978 年以来的 20 多年,我国人民科学意识不断提高,城市民众生态意识普遍增强,遂希望生态研究单位不要只偏向大森林、海洋、湿地等广阔领域,而要投入一定力量研究人口聚集的城市生态环境。社会的这一要求、政府的重视,尤其是可持续发展的概念提出以来,城市生态控制的研究发展很快。从定性到定量,多种方法得到应用,在有些城市,并已形成系统。

二、城市生态环境调控及决策支持系统

我们在这里简介杨士弘(2001)等专著中关于这方面的主要内容,其中含杨邦杰(1992)等的研究成果。

1. 基本原理

城市生态系统调控的基本原理主要包括:生态工艺原理、内含循环原则、技巧原理和共生原则、生态协调原理、内含相克相生原则、最适功能原则和最小风险原则。

2. 调控目标、手段和方法

系统的调控目标:经济高效,社会和谐,环境优美,综合协调。

调控的主要手段和方法:生态工艺设计与改造,生态关系规划与协调,生态意识的普及与提高。

为了体现上述几个方面,使城市生态调控顺利进行,以利城市的可持续发展,杨邦杰等设计的城市生态控制决策支持系统功能完善、运行良好,在技术和实用方面取得了较好效果。该系统是以计算机技术为基础,应用城市生态动力学的原理与控制论方法,结合系统科学、管理科学中的有关学科成果的人—机交互系统,可为城市生态之优化管理服务。

该系统是一个完善的决策支持系统,含先进的功能结构和规律结构。图 10-3 是杨邦杰给出的软件结构图,转引自杨士弘(2001)的书。

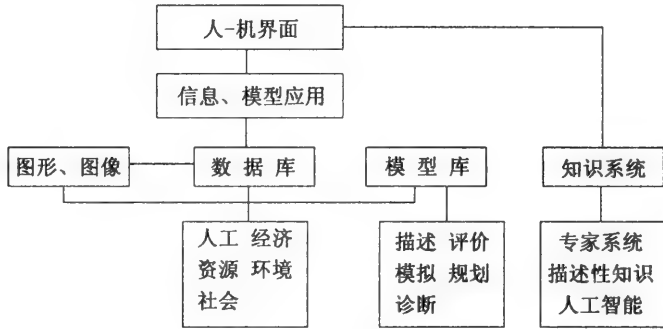


图 10-3 城市生态决策支持系统软件结构

3. 人—机交互试验模拟

城市生态调控的决策支持系统有模拟功能,它能利用模拟模型把复杂的城市生态环境系统转换为简单可视的定性、定量关系,研究系统反馈机制,找出影响系统的关键反馈回路与因素。通过改变模型输入与参数,观察模型输出响应,可以预知城市的动态,为城市可持续发展提供必要的对策建议。

近年来,研制出来并旨在优化管理城市的系统软件,在国内已有几本。因为那些是针对城市整体面向社会各个方面的,而城市生态往往被列于其中的环境部分,这一部分,对于城市生态控制是颇有意义的。而生态工作者在这方面能起到的作用;一方面,从总体的暨综合的系统中,随时吸收有益的“营养”,作为取之不尽的城市生态控制方面的资料信息源;另一方面,生态工作者不断地将利用各种生态控制原理(比如本书有关章节论述的智能生态控制等)得出的阶段性成果,源源不断地输入城市管理综合系统,为其随时补充“营养”。这实际上也是一个系统及其子系统关系的体现之一。如此长期坚持下去,必然形成合理的优化机制,两者相得益彰。这就好比是:在地球科学中,气象学的研究必须利用综合自然地理学的原理,而气象学的新成果,尤其是其中气候学成果,反过来不断为综合自然地理学输入“营养”。

三、城市植被系统管理

据杨小波等(2002),在城市植被的分类体系中,城市植被是由三类植被构成的:①自然植被;②半自然植被;③人工植被。森林在前两种植被中占有重要地位,而人工林在人工植被中占有重要地位。

一般认为,城市林业是现代化林业的一个分支;而城市的森林则是成片森林为主体、乔、灌、草相结合的森林,这样说来,城市森林,已并不限于树木,也含有草的概念。城市森林同人们所说广大林区的林业的另一不同是,它同城市建设的适应性关系,有相当多的时候,是通过人为调节,使其与城市自然、社会功能相适应。城市林业的功能是多方面的,有些是比较直接的;它能够支持城市的可持续发展,改善城市的生态环境,丰富城市的商品供应,提高城市及近郊居民的文化、福利水平。在城市森林的建设当中,加强其生态系统和城市景观系统的经营、管理是很重要的事。这一方面要保障林业及草坪等在内的绿地建设优化,有益于生态环境本身的可持续发展,又要使经济投入不致太多。这就须用现代方法设计优化方案并采用合理的经济运筹手段。下面先讲述赵道胜(1995)根据福里斯特(1986)的系统原理、对绿地面积的预测结果,关于城市造林经济问题,将专立一款说明。赵道胜针对城市森林功能确定系统目标,将城市森林系统视为复杂的社会经济系统,考虑到该系统的复杂性和可用资料的有限性、局限性,采用福里斯特早年提出但用于许多领域的系统动力学(system dynamics,也有人译作“系统动态学”)方法,建立了模式。甲、乙、丙三个城市仿真结果,给出各种绿地的预期结果。表 10-2 是我们摘录列出的。这是在 1994 年完成的对 2000 年的预测结果,是提前 6a 的。也就是说,提前量是比较大的。这样便于决策者早有思想和物质上的准备。

表 10-2 2000 年三城市主要绿地一览表

城市代号	绿地覆盖率 /%	人均公共绿地 /m ² 、人 ⁻¹	专用绿地面积比例 /%	防护绿地面积比例 /%
甲	47.4	27.90	28.21	13.63
乙	36.2	8.75	44.54	14.54
丙	30.2	2.56	31.32	46.87

由于绿地的科学比例需要多方面条件,才能很好确定,所以像人们对于一切带有规划预测性质的研究成果的态度一样,不能要求得特别高,因为预测问题面前,成败总是兵家常事。正确的态度是,随着新方法的运用,新信息的不断输入,预测结果,可预期,是越来越好,但也不排除新的方法会失败以致不如只用老方法好的可能性。试想:只是一个大气物理运动问题,人们对其规律研究这么多年,依其作天气预报还常有误,那么像城市这么复杂的系统,怎么会一研究就会得出准确预报呢!相反,随着生态动力和控制原理总体学科的发展,城市绿化预决策乃至优化控制之实践,今后的效果会更好。

四、以生物措施控制城市环境的生态-经济分析

森林在城市环境中的作用是人们所熟知的。但是,人工造林须投资。如何衡量造林这一改善城市环境的生态控制主要手段?从生态经济出发加以研究,是很必要的。这方面工作一个很好范例,是 Popoola 等(2002)的研究;为恢复阿巴丹(尼日利亚一城市)城市

环境实施造林,对比项支付意愿度(willingness to pay,简记 WTP)如何? Popoola 在收集大量数据资料的基础上,作了统计分析和模造,给出决策建议。

1. 分析与建模

用学生氏 t 检验,方差分析(ANOVA)以及相关回归分析。

常规的最小二乘法(OLS)的简单回归方程模式,被用于寻找引出的 WTP 值(因变量)与社会-经济因子(自变量)之间的关系。所确定模式的一般形式是:

$$W_d = f(X_d, \dots, X_k) \quad (10-6)$$

式中, W_d 是对城市环境恢复的各个人 WTP, X_d 是个人收入,年龄,受正规教育水平,住所面积,在所研究地区内的居住时间,环境意识,性别,婚姻状况,居住地与森林保护地的距离、工作情况、原居住地及原来对森林保护地的认识水平; $X_k = 1, 2, \dots, 12$, 系所考虑参数的数字代码。

待选用以便从中择优的基本形式有如下三种:

①线性

$$W_d = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{12} X_{12} + E_d \quad (10-7)$$

②半对数

$$W_d = \ln b_0 + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2 + \dots + b_{12} \ln X_{12} + \ln E_d \quad (10-8)$$

③双对数

$$\ln W_d = \ln b_0 + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2 + \dots + b_{12} \ln X_{12} + \ln E_d \quad (10-9)$$

式中, b_0 是常数, b_1, b_2, \dots, b_{12} 是回归系数, E_d 是余项即误差项。

2. 主要结果及控制应用

Popoola 等利用统计分析给出的结果及用途如下:

(1)WTP 值分布

调查表明,77.3%的响应者愿意为城市植树造林投资,越接近林地的单位,积极性越高,愿投资金额越多。决策者和森林管理者,可以用这些统计结果作为附加输入资料以评价公众对“通过人工造林规则以加强环境保护”的支持程度,即评价他们对阿巴丹城市森林保护措施的支持程度。

(2)因变量

282 个(占 77%)响应者愿为此计划每月付款 0.5~5 美元。

(3)社会-经济各自变量内部 WTP 值的比较

二元自变量被分离出来,并用描述统计量, t 检验作比较,各变量被确定如下:“阳”指示男性响应者表示肯定,“已婚”指示已婚响应者表示肯定,“当地”指示阿巴丹当地人表示肯定,“雇员”指示受雇用的响应者表示肯定,“先知”指示对城市中心区内森林保护之存在已有先验知识的响应者表示肯定。检验表明:表示“肯定”与“否定”平均 WTP 无显著差异($p > 0.05$)。对非二元自变量所作方案分析的结果表明:在 4 个教育程度级别(小学、中学、大学和研究生)内部,在 6 个年龄段(15~24 岁、25~34 岁、35~44 岁、45~54 岁、55~64 岁以及 65 岁以上)内部以及在 3 个月收入水平(低:10~100 美元;中:100.01~200 美元;高:超过 200 美元)内部,差异是不显著的。

(4)自变量之间的相关

每两个自变量之间的显著相关关系,存在于以下几种情形:年龄和雇用关系之间,年

龄和婚姻状况之间,年龄和所研究地区内居住时间之间,年龄和原有森林保护知识之间,年龄和住宅大小之间,收入和工作性质之间,婚姻状况和工作性质之间,受教育程度和环境意识之间,原住城市 and 居住时间之间,以及森林和居住时间之间。所有这些关系,都已求出相关系数,它们大都与预期推测是一致的。

(5) 回归分析

按 $p < 0.05$ 标准检验,三种回归方程的函数形式都是显著的。这意味着:在每一回归方程中受检验的社会经济自变量至少有一个已经影响了因变量 WTP。

然而,双重对数函数是回归模式中被选中的最佳方程,它有最高的可决系数($R^2 = 0.27$),最小的标准误差(0.6884)和最大的 F 值(5.758)。

(6) 完全模式

完全回归模式将引出的 WTP 平均值的对数处理为因变量,将一切社会-经济变量的对数处理为自变量。虽然在解释 WTP 响应的方面,有几个因变量是不显著的,但是全回归模式的 F 值是 5.758,这说明因变量与各个自变量之间有显著关系($p < 0.01$)。学生氏 t 检验指出:只有两个社会经济变量影响 WTP 值。这样,雇用状态和居住地与森林保护地距离,都是很显著的($p < 0.01$),这对于阿巴丹市区以环境恢复为目的的植树造林计划的 WTP 有正面影响。决定性系数值 R^2 为 0.27,这说明:社会经济自变量只有 27% 贡献于因变量的变化。

(7) 自变量对 WTP 的影响程度

尽管经济收入作为社会经济变量,显示其不显著性,但可以有把握地预期:它对 WTP 会有显著影响。然而,其不显著的原因是:被抽样的群体中的许多人是低收入者。因此,他们所关心的是眼前生活需要,而不是长远的生态环境的改善。

3. 对城市植树造林社会经济控制的一些认识

作为陆地生态系统的主体的森林,在大范围环境中的作用,最重要的当然是体现在一个国家或一个大的地理区域的森林覆盖率上,以致人们对于生长在山区、农村和海滨等辽阔地域上的树木,尤其是对大片森林,是非常重视的。但是,随着社会经济的发展,整个地球上许多国家的城市化水平大大提高,并有继续发展的趋势,发展中国家这种进展步伐尤其迅速。生活在城市里的人所接触到的绿地首先是城市周围及住宅附近的树木、草坪等。把城市周边林地(有些作者亦称之为城市森林)视为城市优质环境的保护者,是很合适的,森林作为城市及其居民的“忠诚卫士”可以说是名符其实。早在二十多年前,国内就有关于树木与环境保护关系之类的书,从机理上讲述了树木对环境主要是城市环境的保护功能。类似的文字材料起到了宣传森林在改善城市环境中的作用,提倡城市绿化——植树造林,发展草坪等,以促进政府有关部门及社会企业和个人,为此投资,因为在城市及其周边植树种草,发展绿地,总是要投资的。如何投资,由谁来投资,投资多少(比如应占国民经济收入或市财政预算中的多大比例),这都存在着一个优化控制问题。但如果缺少定量的抽样调查和计算分析资料,作出的控制决策就只能是定性的,带有较大的主观性,以致在某一时期发展了城市绿地,过不长时间又毁掉,势必造成浪费,对绿化也有负面影响(因为有时投资后,效果不佳)乃至影响投资者再投资的积极性。为解决这类问题,开展像阿巴丹市那样的研究,则是有意义的,那是城市森林的优化经济模式建立的必要基础。我国近二十年来,城市化发展很快,是世界上大城市较多的国家之一,东部人口密度大,城市距离较近,为使城市功能增强保障城市环境的“长治久安”,

以利可持续发展,加强定量的城市森林经济控制方法的研究,尤其显得必要。当然,所用方法和调研对象分类,可以进一步优化。必要时可以作一定的试验设计,比如用本书第六章第二节的均匀设计,并把结果用于城市生态可持续发展的研究。

第三节 水域附近生态经济最优控制

本节论述湖泊流域城市可持续发展的生态经济最优控制问题。简介其投入产出方法。投入产出模型是利昂节夫首创并于 1973 年获诺贝尔经济学奖的重要经济数学模型,在国民经济中有多次应用。我国自乌家培、张守一的工作以来,也有较长时间应用历史。近来,李林红从生态经济角度,以滇池流域资料为基础,建立一个最优控制模型,求出该流域经济、生态最优控制模型。鉴于该模型对于湖泊流域城市可持续发展研究有较好的参考价值,这里作简要介绍。

一、环境经济投入产出表

该种投入产出表,如表 10-3。

表 10-3 昆明市环境经济投入产出表

投入	产品部门	环保部门	最终产品				市外调入	总产出
			资本形成			最终净需求		
			产品	资源	环保			
产品部门	X_p	Z_p	I_{p1}	I_{e1}	I_{w1}	D_p	I_{np}	Q_p
环境资源	X_e	Z_e	I_{p2}	I_{e2}	I_{w2}	D_e	I_{ne}	Q_e
废 物	X_w	Z_w				D_w	I_{nw}	Q_w
新创造价值	N_p	N_x						

以传统的投入产出表为准将产品部门加以划分,如农业,其他非金属矿采选业,纺织业,建筑业,商业,金融保险业等几类;污染物划分为总磷、总氮、COD 等 m 类;环境资源划分为水、森林、矿、耕地等 p 类。

$$\begin{aligned} X_p &= [x_{ij}^p]_{n \times n} & X_e &= [x_{ij}^e]_{p \times n} & X_w &= [x_{ij}^w]_{m \times n} \\ Z_p &= [Z_{ij}^p]_{n \times m} & Z_e &= [Z_{ij}^e]_{p \times m} & Z_w &= [Z_{ij}^w]_{m \times m} \\ I_{p1} &= [I_{ij}^{p1}]_{n \times n} & I_{p2} &= [I_{ij}^{p2}]_{p \times n} & I_{e1} &= [I_{ij}^{e1}]_{n \times p} \\ I_{e2} &= [I_{ij}^{e2}]_{p \times p} & I_{w1} &= [I_{ij}^{w1}]_{n \times m} & I_{w2} &= [I_{ij}^{w2}]_{p \times m} \\ D_p &= [d_i^p]_{n \times 1} & D_e &= [d_i^e]_{p \times 1} & D_w &= [d_i^w]_{m \times 1} \\ Q_p &= [q_i^p]_{n \times 1} & Q_e &= [q_i^e]_{p \times 1} & Q_w &= [q_i^w]_{m \times 1} \\ a_{ij}^p &= x_{ij}^p / q_j^p & a_{ij}^e &= x_{ij}^e / q_j^e & a_{ij}^w &= x_{ij}^w / q_j^w \\ C_{ij}^p &= \frac{Z_{ij}^p}{r_j^w q_j^w} & C_{ij}^e &= \frac{Z_{ij}^e}{r_j^w q_j^w} & C_{ij}^w &= \frac{Z_{ij}^w}{r_j^w q_j^w} \end{aligned}$$

其中,

$A_p = [a_{ij}^p]_{n \times n}$ 为中间产品间的直接消耗系数;

$A_e = [a_{ij}^e]_{p \times m}$ 为中间产品对环境资源的直接消耗系数,

$A_w = [a_{ij}^w]_{m \times m}$ 为中间产品的废物排放系数,

$C_p = [c_{ij}^p]_{m \times m}$ 为环保部门对中间产品的治理消耗系数,

$C_e = [c_{ij}^e]_{p \times m}$ 为环保部门对资源的治理消耗系数,

$C_w = [c_{ij}^w]_{m \times m}$ 为环保部门治理排放系数,

r_j^w 为对策 j 污染物的治理份额。

$B_p = [I_{ij}^p / \Delta q_j^p]$, $B_e = [I_{ij}^e / \Delta q_j^e]$, $B_w = [I_{ij}^w / r_j^w \Delta q_j^w]$, $E_p = [I_{ij}^{p2} / \Delta q_j^p]$, $E_e = [I_{ij}^{e2} / \Delta q_j^e]$, $E_w = [I_{ij}^{w2} / r_j^w \Delta q_j^w]$, 分别为产品与资源投资系数矩阵。

二、模型的建立及结果

根据投入产出表,先导出差分方程,再构造二次型函数,最后用黄学良(1997)所述的最优控制模型,得出本问题的最优控制解。结果指出,在“十五”期间,为了把污染物的排放限制在合理的范围内,必须降低第一、二、三产业的发展速度,特别是降低第二产业的发展速度。而这样的措施,与人们发展经济的目标相违背,说明滇池流域的经济发展与生态环境的保护之间的矛盾是非常突出的,似已达到不可调和的地步。要使生态环境与国民经济很好地协调发展,即污染物排放量的增长率保持在 10% 以下,国民经济发展的速度保持在 10% 左右,污染物的治理份额应当提高到 55% ~ 70%;适度加大环保投资是有益的,这一方面可以拉动第二产业的发展;另一方面可以提高污染治理份额;从三个产业结构来看,优先发展第三产业,对可持续发展是有利的。

第四节 可持续农业(SA)问题的多重标准分析

为满足至少三维(域)可持续农业(SA)发展的要求,必须考虑社会、生态和经济这三个方面。下面的内容说明多重标准分析(一种多维方法)是研究农业可持续性的一种有用的运筹方法论。

该方法论用于可持续研究,至少有如下 6 种理由。

①它是同时考虑各因素不同影响并对复杂问题进行分析的一种工具。

②它允许人们处理混合的(定量的和定性的)信息,给出用于经济-生态模造的因次差异问题。

③它对于目标的数目和性质没有任何限制,只是要求指出那些目标的相对重要性(即优先性)。

④它可处理现代计划问题和各种不同形式信息的决策者们所提出问题的矛盾性。

⑤它允许从常规决策到瞬间、过程决策的转换。

⑥对于面临简单和“受迫”解所不能解决的现代公共决策的要求,它可以满足。

一、方法

这项工作是以大量资料为基础,用数学方法进行研究的。

1. 多元分析

为了进行分类,一种多元统计方法——聚类分析——被运用。聚类分析是把个体即

对象分成组(以便使同类对象中的各个对象聚在一起,而不同类的对象被分开)的方法。这样,聚类分析的初始目的就是依据对象具有的类别把它们分成组。这样,所得的对象聚类结果将展示内部的(一种聚类结果之内的)高度的同质性和外部的(两种聚类结果之间的)高度的均匀性。

在聚类的时候,一个重要的过程是关于对象相似性量数的决策。在进行聚类时,有两种不同的距离计算方法必须考虑:(i)外聚类(infracluster)计算,对组内每两个对象间的最小距离“负责”;(ii)内聚类(intercluster)计算,对每两聚类之间的最大距离“负责”。欧氏距离(Euclidean distance)是最普遍的距离量数(Wilks, 1995)。欧氏平方距离(squared Euclidean distance)被用作外聚类量数。用于确定聚类—聚类(内聚类)的标准是 Ward 的最小方差法。最常用的聚类算法可分成两个一般的类别:分层的;不分层的。分层方法包括构造一个类似于树结构的层。其表达方法叫做“树图”(dendrogram)或树图。

2. 离散多标准方法

设计多标准模造方法的目的是:对于在“假定定量或定性数值的标准下,估价离散备选”这一问题,按照它们的属性,寻找优先备选解。这些方法用多重标准和优先权来研究备选。这里所说的备选可以是选择计划或策略,管理带或管理区,可能居住区,城市更新邻域等,支配任何多标准分析的都有三项基本原则:(i)评价矩阵的构建;(ii)优化权矩阵的确定;(iii)通过算法研究得出估计矩阵。

评价矩阵反映由一组标准(即标准集)所决定的备选的属性。标准内部的矛盾预期在评价矩阵中,这使该矩阵的直接内插不够客观。为解决标准之间的这一矛盾,须作第二步的工作,即定义优先权矩阵。该矩阵控制各标准的决策者们(DMS)面临不同看法时由他们所确定的各标准的重要性(优先权或权重)。在多标准分析中的最后一步是用一种探索方法来确定评价矩阵。这样的矩阵含备选中选择机会的一种分类。

在这项工作中所用的探索算法是简单加法权重(SAW)模式(Howard, 1991)。从形式上来说,权重 W_j 是从线性利用函数导出的。以其基本矩阵形式出现的 SAW 技术是

$$U = E \cdot W^T \quad (10-10)$$

第 i 次备选的成就被计算为:

$$U_i = \sum_j w_j e_{ji} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J \quad (10-11)$$

这里 U_i 是第 i 个备选的评价“痕”或总“痕”。在正常情形下,假定 e_{ij} 和 w_j 的较高值代表转好的痕,这样,由 $U_i > U_{i'}$, 判断 i 比 i' 好。

w_j 是第 j 个标准的 DMs 权重即相对重要性。

e_{ij} 是第 i 个备选和第 j 个标准的数值属性。

决策规则是:伴有最高痕(加权了的属性水平之和)的备选被认为是最优的:

$$U_{\text{optimal}} = \max_{\text{一切 } i} U_i \quad (10-12)$$

方程(10-11)和方程(10-12)可被重写为

$$\text{maximize} \sum_{j=1, \dots, J} (w_j e_{ji}) \quad j = 1, \dots, J; \quad \text{或} \quad i = 1, \dots, I \quad (10-13)$$

伴有最高痕即估计的备选是就每一个备选按以下步骤计算的:以一切标准的加权痕的求和所伴随的适应权重,乘以每个值。最后,SAW 被作为一种很有效的方法,用于多标准分析。

在本研究中,备选是经由聚类分析的分类过程中发现的农耕系统(farming system)。

3. 可持续性的指标

农耕系统的可持续性指标分三组,每组为 10 个。

(1)经济指标

所用的 10 个经济指标是:①灌溉条件,②毛收入,③用于农耕的土地面积,④企业类别,⑤银行贷款,⑥官方补助金,⑦长期雇员,⑧季节性雇员,⑨机械的应用,⑩财产使用时间。

(2)社会指标

所用生活质量的 6 个指标是:①生活标准,②社会化程度,③人在生产单位中的关系,④基础教育,⑤农业教育,⑥现代医疗;所用生态意识指标是:A 对外界生态因子的了解程度,B 支配生产的规律,C 自然环境的保护;所用技术指标是:为解决环境问题所用技术的力度。

(3)生态指标

生态指标关系到水、土壤和能源利用(农业输入),人的健康,虽然不直接受农业生态问题的影响,但是有间接的影响,比如遭受烈性杀虫剂危害。第三种标准关系到水土保持和生产力中起重要作用的农作实践。这样,10 个生态指标是:①杀虫剂的使用,②化学肥料的施用,③土壤中的致病物,④水中的化学含物,⑤有机厩肥的施用,⑥休闲,⑦作物轮作,⑧免耕,⑨植物病害,⑩健康问题。

二、实用结果

1. 聚类的解释

按照作物栽培的茬数,经分辨,农耕系统被聚为 4 种类别:①一茬作物,单茬每年只种收一茬;②两茬作物,纯玉米-大豆系统;③三茬作物,混合玉米-大豆系统;④超过三茬作物,多茬。

表 10-4 示每种聚类的个例数。按百分率领先的第二种方式(51%)——强化的玉米-大豆系统——在该地区占优势。栽培玉米和大豆的农场管理者,在该地区,实际上是占大多数的。实践多重栽培或灌溉的农场管理者是第二大的聚类群体,占 22%。我们有理由视其为以家庭为基础的栽培的单茬栽培代表该地区的第三大的农场系统,占 15%。

表 10-4 聚类结果的频数分布

聚类结果	频数	%
1. 单茬	17	15
2. 纯玉米-大豆	58	51
3. 混合玉米-大豆	14	12
4. 多重栽培	25	22
总计	114	100
失去	(14)	

2. 指标的结合与备选:评价及优先权矩阵的确定

评价矩阵由备选和标准组成,农耕系统 4 个聚类结果表示备选,可持续的 30 个指标表示标准。起决策者作用的三位专家(一位农业经济学家,一位农业社会学家,一位生态

学家)给优先权打分。

3. 可持续农业的决策问题

30 个指标被结合成 6 个主要目标:

①农场:农场方面有 10 个指标:灌溉量,毛收入,栽培面积,企业,银行担保,沟渠,全日制劳动力,临时工、机械的使用,设备使用时间。

②生活质量,生活标准,社会化程度,与社区关系。

③教育:教育,继续教育,现代化医疗。

④卫生的一般问题:人的卫生问题,水的化学污染,植物病害,土壤病害。

⑤农业管理实践:杀虫剂的使用,化学肥料的施用,有机肥料的施用,休闲,轮作,免耕。

⑥人们关心的主要环境问题:对外界因子的了解,技术的应用,生产规律,自然保护。

这些目标在文献中也叫入射角。结合过程将 30 个标准聚类成 6 个较小的目标,每一目标中,标准的数目是不同的。这一过程简化了每一步中估计矩阵的计算。首先,对于每一个入射角,一切备选,都被评价。对于每一个备选,所得的估计痕,都被浓缩在一个具有不同入射角(作为标准)的新估计矩阵之中。其次,使所引出的这个矩阵服从一个新的评价,产生涉及三维可持续性的一个次估计矩阵。第三对每个农耕系统一个新的评价是用生成最终完整估计痕的这一估计矩阵来进行的。该过程的一个重要方面是标准痕(e_{ij})和权重尺度(w_j)的标准化。整个过程可以在 Miranda 的文章中找到(Miranda, 1999)。

表 10-5 综合估计矩阵

出发点	农耕系统 1	农耕系统 2	农耕系统 3	农耕系统 4
经济	0.6956	0.7189	0.6232	0.7571
生态	0.8054	0.7708	0.6774	0.7081
社会	0.8012	0.8643	0.7264	0.7626

4. 可持续性一般评价指标之例

据 Miranda(2001)在巴西用方程(10-13)的试验计算,总体可持续指数(OSI)如下:

农耕系统 1_{osi} = $0.6956 \times 0.3333 + 0.8054 \times 0.3333 + 0.8012 \times 0.3333 = 0.7673$

农耕系统 2_{osi} = $0.7189 \times 0.3333 + 0.7708 \times 0.3333 + 0.8643 \times 0.3333 = 0.7846$

农耕系统 3_{osi} = $0.6232 \times 0.3333 + 0.6774 \times 0.3333 + 0.7264 \times 0.3333 = 0.6756$

农耕系统 4_{osi} = $0.7571 \times 0.3333 + 0.7081 \times 0.3333 + 0.7626 \times 0.3333 = 0.7426$

由以上的计算结果,发现可持续指标从大到小的排序结果:

农耕系统 2(0.7846) > 农耕系统 1(0.7673) > 农耕系统 4(0.7426) > 农耕系统 3(0.6756)。

农耕系统 2——纯玉米-大豆系统——是最优的可持续农业系统。单一栽培即家庭农场系统是可持续次最优系统。多项栽培系统即灌溉系统是第三位的,而混合的玉米-大豆系统是排在最后的系统。引起人们注意的是:被人们作为绿色革命榜样的那个系统——玉米-大豆系统——标记为最好的可持续性。以小本运营的家庭农场系统,占据了第二的位置,这一结果指出;由加强农业系统标准作出的假定,可能是值得怀疑的。

不难看出,在上述例子的计算中,权重起着重要的作用。在确定权重时,不同的专家给出的结果可能不同。一般来说,从生态观点出发的生态工作者,往往希望看得远一些,使可持续保持更长时间。在实际运用时,可以考虑,对权重作一定改变,再看不同权重的结果,再观察结果排序是否有变化。比如在我国现实条件下,既保持可持续发展,又要注重经济效益、社会效果的权重可适当小些,生态效果的权重适当大些,而不必“三一三余一”地处理。依表 10-5,以上的相应计算,可改写为

$$\text{农耕系统 } 1_{\text{csi}} = 0.6956 \times 0.3333 + 0.8054 \times 0.3666 + 0.8012 \times 0.3000 \div 0.77$$

$$\text{农耕系统 } 2_{\text{csi}} = 0.7189 \times 0.3333 + 0.7708 \times 0.3666 + 0.8643 \times 0.3000 \div 0.78$$

$$\text{农耕系统 } 3_{\text{csi}} = 0.6232 \times 0.3333 + 0.6774 \times 0.3666 + 0.7264 \times 0.3000 \div 0.67$$

$$\text{农耕系统 } 4_{\text{csi}} = 0.7571 \times 0.3333 + 0.7081 \times 0.3666 + 0.7626 \times 0.3000 \div 0.74$$

结果表明:农耕系统 $2_{\text{csi}} > \text{农耕系统 } 1_{\text{csi}}$ 农耕系统 $4_{\text{csi}} > \text{农耕系统 } 3_{\text{csi}}$ 。

在我国,关于耕作制度研究和实际改革的材料是很多的。早在 1979 年,熊毅院士就发表了《对苏南地区耕作制度的看法和建议》(见人民日报,1979.1.13)一文,后于 1987 年刘巽浩、韩湘玲出版了《中国耕作制度区划》一书(北京农业大学出版社),而耕作制度区划,在 20 世纪 80 年代,全国各省都已作出。这些资料,如果能用前述方法处理,则对于定量地实践各个层次的农业可持续发展,将有重要意义。同时,这项工作的计算也不算难。

第五节 农业生态-经济-社会可持续发展的层次

从本书第二章的图 2-1 可以清楚地看出,我们对生态控制的理解涉及到生物、环境和社会三个圈层的相互作用,而不是生物和环境两个圈层的关系问题。社会性当然离不开人对自然的作用,主要是人工生态力源的作用。如果说一些学者讨论过的未来大范围改造生态条件的设想,比如改变现有的地球上的海洋大陆布局等(见 Brouer, 1980, *Weather Modification: Prospects and Problems*)为时太远,而对于局部地区的生态-经济-社会可持续发展研究,则是现实可行的。在这方面,许多不同学科的专家进行过多方探索和研究,如中滕康俊在《人文地理学入门》(中文版,1998,气象出版社)一书中对日本所作的研究,由于涉及方面很多,以往的类似研究多以定性分析为主。但这不能满足可持续发展规划的客观需要。为探索定性定量结合的方案,我们经过调查与多年思考,可试用层次分析(AHP)这种数学方法加以处理。

鉴于我国是发展中大国,在生态县建设中,农业在国民经济发展中占主导地位的县为多,所以本节只论述涉及农业生态控制的开发层次问题。其他行业,当可借鉴。

一、层次关系的建立

某生态县为实现农业生态-经济-社会可持续发展,拟定的总体目标层次 A 是:在确保粮食、棉花、油料作物高产稳定的前提下,发展园艺(蔬菜、果树、花卉)的现代化,工厂化农业,增强出口创汇能力,增加农民经济收入;与此同时,保持土壤、大气、水质、地貌等生态动力源不受破坏,力争生态环境增优,把全县建成以农业为支持产业,科工贸全面发展,地力储备雄厚的山川秀美的现代化生态县。

围绕这一总体目标,有一个中间约束层 C,该层次分为如下三个子层次:

C₁层—— 巩固和发展粮食、棉花、油料的原有生产基地,兼顾原有的相关作物,搞好水土保持,增加农家肥用量。

C₂层—— 发展现代化的工厂化农业,在原有日光温室的基础上,优化建设现代化温室群,形成其中的优良生态环境,以利其栽培的蔬菜、果树、花卉等园艺作物高产、优质、高效,成为农业增收、出口创汇的主要产品。

C₃层—— 积极采用有效的治本与治标相结合的减灾增产措施,从长远的可持续发展的战略观点出发,努力改善生态环境,减轻旱涝灾害对全县农业的威胁,增强农业生产储备。

这里的第三个层次,从本书的观点看来,正是生态控制的措施层,也就是生态控制原理在生态县建设中应用的一个层次。这些措施的初步设想,来源于当地群众、干部以及相关科技专家的共同智慧,用 Delphi 调查和专家系统分析综合,共可分为 14 种措施,我们用 P_1, P_2, \dots, P_{14} 分别表示之。现简述如下:

P_1 —— 兴修水利工程,完善全县农田灌溉系统,增加水库库容,从工程措施上提高减灾能力;

P_2 —— 完善工厂化农业措施;

P_3 —— 在山区实行飞播造林作业,减少荒山面积,提高全县森林覆盖率;

P_4 —— 更新并扩建农田防护林网,强化其保护农田的生态功能;

P_5 —— 发展牧业,增加有机肥在施肥量中所占比例;

P_6 —— 发展果树生产,以提高经济效益和生态效益;

P_7 —— 科学建设草场;

P_8 —— 建设农业残留物和污染物处理基地;

P_9 —— 发展水产养殖;

P_{10} —— 开展小流域治理,增强水土保持功能;

P_{11} —— 采用防低温工程措施;

P_{12} —— 对小麦类作物,实行免耕留茬;

P_{13} —— 人工降雨、消雹措施;

P_{14} —— 大面积农田土壤改良。

二、数学模型概要

在本研究中,目标是用层次分析法衡量各个生态控制层次的权重,以作为生态县发展的控制决策的一种依据。设在生态控制中,共有 n 个项目,它们的权重分别为 $W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n$, 并且有

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (10-14)$$

为了进行比较,我们给出表 10-6。

表 10-6 n 个控制项目的两两相互比较

	W_1	W_2	...	W_j	...	W_n
W_1	W_1/W_1	W_1/W_2	...	W_1/W_j	...	W_1/W_n
W_2	W_2/W_1	W_2/W_2	...	W_2/W_j	...	W_2/W_n
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
W_i	W_i/W_1	W_i/W_2	...	W_i/W_j	...	W_i/W_n
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
W_n	W_n/W_1	W_n/W_2	...	W_n/W_j	...	W_n/W_n

我们并令表 10-6 中的 $W_i/W_j = a_{ij}$ 。

根据这 n 个项目的相对权重关系,构造 n 行 n 列的判断矩阵 A ,其中的元素为 a_{ij} 。
即我们有

$$A = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \cdots & W_1/W_j & \cdots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \cdots & W_2/W_j & \cdots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_i/W_1 & W_i/W_2 & \cdots & W_i/W_j & \cdots & W_i/W_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \cdots & W_n/W_j & \cdots & W_n/W_n \end{bmatrix}$$
$$= (a_{ij})_{n \times n} \tag{10-15}$$

并有 $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $a_{ij} = a_{ik}/a_{jk}$, 这里 $i, j = 1, 2, \cdots, n$, 凡符合以上条件的,就被认为具有完全一致性的条件。

现有公式

$$(a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_i \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \lambda W \tag{10-16}$$

这里 λ 是矩阵 A 的特征根,每个项目的权重是 A 对于特征向量的各个分量。

生态县农业生态-经济-社会控制是复杂大系统(详见本书第十一章)的全局性问题,而不是某一个项目承担单位的局部问题,既然是全局性的生态控制就应在综合集成方法论的指导下,全面考虑,综合决策。就生态控制这一人工生态动力源的实践活动投入的人力、物力和资金来说,无论是具体措施实施的时间次序,或者是开发的深度、广度,都应当很好地统一起来。为此,我们选用层次分析法,因为层次分析法是一种定量确定生态-经济控制层次和项目权重的适宜方法。在运用这种方法时,先设法求出判断矩阵。然后,在判断矩阵具有完全一致性的前提下,通过求解特征值

$$A_w = \lambda_{\max} W \tag{10-17}$$

便可以求出正规化特征向量(假定各控制项目的总权重为 1),该特征向量便指示出 n 个控制项目的各自权重。

三、构造判断矩阵

判断矩阵是生态经济控制项目层次分析的出发点和关键步骤。某一层次判断矩阵中的元素表示:针对其上一个层次的某一元素 A_k 而言,该层次中的各有关元素相对重要性的状况。所构造判断矩阵如表 10-7。

表 10-7 判断矩阵构造用表

A_k	B_1	B_2	...	B_j	...	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1j}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2j}	...	b_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
B_j	b_{j1}	b_{j2}	...	b_{jj}	...	b_{jn}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nj}	...	b_{nn}

在表 10-7 中, $b_{ij} = B_i/B_j$, 它表示对于上一个层次 A_k 来说, B_i 对 B_j 的相对重要性的判断值, b_{ij} 取 1, 3, 5, 7, 9 五个等级, 其中

$b_{ij} = 1$ 表示 B_i 与 B_j 同等重要;

$b_{ij} = 3$ 表示 B_i 比 B_j 重要一点;

$b_{ij} = 5$ 表示 B_i 比 B_j 重要;

$b_{ij} = 7$ 表示 B_i 比 B_j 重要得多;

$b_{ij} = 9$ 表示 B_i 相对于 B_j 极其重要。

概括起来, 我们可以这样说: b_{ij} 的值越大, 说明 B_i 对 B_j 的相对重要性越大。

判断矩阵中的元素显然应满足

$$\begin{aligned} b_{ij} &= 1 \\ b_{ij} &= 1/b_{ji} \\ (i, j &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (10-18)$$

构造判断矩阵的关键是考察其是否具有-致性。如果满足如下条件

$$\begin{aligned} b_{ij} &= b_{ik}/b_{jk} \\ (i, j, k &= 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (10-19)$$

则为完全一致。这种一致性将在下面检验。

四、层次排序检验

分为单排序和总排序检验, 具体如下。

1. 层次单排序

层次单排序的目的是根据判断矩阵来计算对于上一个层次的某元素来说, 确定本层次中与其有关的元素的重要性次序的数值。层次单排序可以归结为计算判断矩阵的特征根和特征向量问题, 即对判断矩阵 B

$$BW = \lambda_{\max} W \quad (10-20)$$

计算满足的特征根, 这里 λ_{\max} 为 B 的最大特征根, W 为对应于 λ_{\max} 的正规化特征向量。

W 的分量, W_i 即是相应元素单排序的数值。

为了检验判断矩阵的一致性, 需要计算其一致性指标 CI (consistency index), 这个指标的计算公式是

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10-21)$$

当判断矩阵完全一致时, $CI = 0$ 。 $\lambda_{\max} - n$ 的值越大, 则 CI 就越大, 说明矩阵的一致性越差。为判断矩阵是否具有满意的一致性, 需将 CI 与平均随机一致性指标 RI 作比较。对于一阶和二阶判断矩阵, 总是具有一致性的。当阶次为 3 到 10 的时候, 用判断矩阵随机一次性比例

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10-22)$$

加以判断, 必须使 $CR < 0.1$ 。

2. 层次总排序

利用同一层次中层次单排序的一切计算结果, 就可以计算某一层次中所有元素相对于上一层次的重要性, 这就是层次总排序。

假定上一层次所有元素 A_1, A_2, \dots, A_m 的总排序已经完成, 得到的数值分别为 a_1, a_2, \dots, a_m 与 a_i 对应的本层次元素单排序结果为 $b_1^i, b_2^i, \dots, b_n^i$ 。在假定 B_j 与 A_i 无关的条件下, $b_{ij} = 0$, 可得出层次总排序表和归一化正规向量。并进行一致性检验。

五、特征根与特征向量的计算

计算按如下几步进行:

第一步, 计算判断矩阵中每一行的 n 个元素的乘积, 即

$$\begin{aligned} M_1 &= \prod_{j=1}^n b_{1j} \\ M_2 &= \prod_{j=1}^n b_{2j} \\ &\vdots \\ M_i &= \prod_{j=1}^n b_{ij} \\ &\vdots \\ M_n &= \prod_{j=1}^n b_{nj} \end{aligned}$$

第二步, 求 M_i 的 n 次方根, 即

$$\begin{aligned} \sqrt[n]{M_1} &= \bar{W}_1 \\ \sqrt[n]{M_2} &= \bar{W}_2 \\ &\vdots \\ \sqrt[n]{M_i} &= \bar{W}_i \end{aligned}$$

$$\vdots$$

$$\sqrt[n]{M_n} = \bar{W}_n$$

第三步,求正规化向量 $(W_1, W_2, \dots, W_n)^T$,其中

$$W_1 = \bar{W}_i / \sum_{j=1}^n \bar{W}_j$$

$$= \bar{W}_i / (\bar{W}_1 + \bar{W}_2 + \dots + \bar{W}_n)$$

$$(i=1, 2, \dots, n)$$

得向量 (W_1, W_2, \dots, W_n) ,该向量的转置向量即为所求的特征向量。

第四步,计算 λ_{\max} ,其算式为

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} \quad (10-23)$$

这里, $(BW)_i$ 为矩阵 B 与向量 W 相乘所得积向量 BW 的第 i 个元素。

六、总体开发层次的最优方案

我们用已经构造出来的各个判断矩阵,对各个层次的比较和计算结果,可以得出 λ_{\max} , CI , RI 和 CR 。结果表明。

围绕生态-经济-社会全面可持续发展这一总体目标,该生态县约束层次中,以 C_1 层最为主要,即应巩固和发展粮食、棉花、油料和生产基地,兼顾原有的相关作物,搞好水土保持,增加农家肥用量。

为实现上述总体目标,最终开发层次的优先地位应是

$$P_4 > P_1 > P_3 > P_2$$

说明该生态县为实现可持续发展在14个可能层次中,应注意按以上4个层次进行,其中最主要的优先层次是:更新并扩建农田防护林,以强化其保护农田的生态功能。

上述的AHP方法可用于任何生态县(乡、村)的层次研究。相信,各个具体用户,在结合当地实际应用研究中,会取得更为合理的结果。

第六节 林业可持续发展的树苗基地策略

减轻自然灾害是实现农业可持续发展的长期策略。造林是减轻农业自然灾害的一种重要措施。农田防护林的营造和更新直接关系到农业的可持续发展。为了满足造林需要,有必要用数学方法确定种苗繁育基地的用地面积。假定单位面积种苗基地的生产量是稳定的。一方面,如果种苗基地面积过大,即其产出量超出造林需求,那么过剩的种苗只能扔掉(假定所生产的种苗对外销售不出去),必然带来经济损失。另一方面,如果种苗面积不足,即满足不了造林需求,那么由于保护农业的树木不足或因防护林自然损毁却不能及时更新,其抗灾功能减退,必然影响农业的可持续发展。这就是因种苗不足影响造林,从而带来大面积农田的经济损失。为了确定满足农业可持续发展需要的树木树苗基地的土地投入策略,我们将按如下步骤作数学模造:

设 c_1 是森林生态功能减弱带来的经济损失[单位:元 $\cdot(0.0667\text{hm}^2)^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$], c_2 是所用种苗地的支出[单位:元 $\cdot(0.0667\text{hm}^2)^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$], c_3 是种苗生产成本[单位:元 \cdot

$(0.0667\text{hm}^2)^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$, x 是种苗用地面积(单位: 0.0667hm^2)。

令 $t=0$ (单位: a) 是森林生态功能减退导致农田生态功能减退的开始时间, $B(t)$ 是生态功能已经减退的农田的面积, t_1 是种苗用于造林的开始时间, t_2 是森林生态功能发挥作用而使农田生态功能增强的开始时间。

因为农田生态功能减退所致经济损失是 $c_1 B(t_2)$, 而种苗繁育支出应是 $c_2 x(t_2 - t_1) + c_3 x$, 所以该模式的目标函数即总支出是

$$c(x) = c_1 B(t_2) + c_2 x(t_2 - t_1) + c_3 x \tag{10-24}$$

为求解 $c(x)$ 的极值问题, 必须确定 $B(t)$ 的形式和 t_2, t_1, x 之间的关系。

讨论 $B(t)$ 不如讨论 dB/dt 方便, 后者表示农田生态功能减退的速率。显然, 在 $0 \leq t \leq t_1$ 时, dB/dt 随着 t 的增加而增加, 在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时, dB/dt 随着 t 增加而减小, 并且有

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{t=t_2} = 0$$

对于 dB/dt 的具体形式, 可以作出如下的假定:

(i) 生态功能的减退, 系从某一中心开始, 以均匀的速率向外作环形传播, 在 $0 \leq t \leq t_1$ 时, 传播半径 $r(t) \propto t$, 因为 $B(t) \propto r^2(t)$, 所以 $dB/dt \propto t$, 记作

$$\frac{dB}{dt} = \beta t \quad (0 \leq t \leq t_1) \tag{10-25}$$

β 称为生态功能减退速率。

(ii) 单位面积(0.0667hm^2) 种苗供应速率是常数 λ , 于是在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 的条件下, 当有面积为 x 的种苗地供应种苗时, 功能减退传播速率为 $\beta - \lambda x (< 0)$, 于是我们有

$$\frac{dB}{dt} = \beta t - \lambda x(t - t_1) \quad (t_1 \leq t \leq t_2) \tag{10-26}$$

由式(10-25)和式(10-26)可绘出图 10-4。

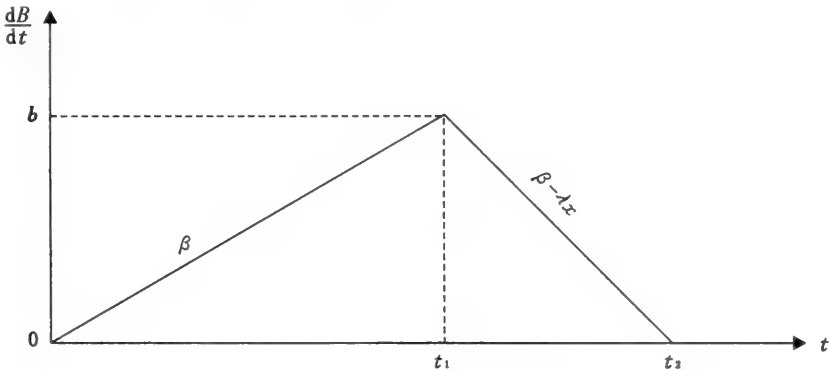


图 10-4 dB/dt 与 t 之间的关系

让我们记

$$\beta t_1 = b$$

由式(10-26)及

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{t=t_2} = 0$$

可以得出

$$t_2 = t_1 + \frac{b}{\lambda x - \beta} \quad (10-27)$$

其推导过程是:

由假定条件及式(10-26),我们有

$$\begin{aligned} t_2(\beta - \lambda x) &= -\lambda x t_1 \\ t_2 &= \frac{\lambda x t_1}{\lambda x - \beta} \\ &= \frac{\frac{b}{\beta} \lambda x}{\lambda x - \beta} \\ &= \frac{t_1 \lambda x}{\lambda x - \beta} \\ &= \frac{t_1 \lambda x - \beta t_1 + \beta t_1}{\lambda x - \beta} \\ &= \frac{t_1(\lambda x - \beta) + \beta t_1}{\lambda x - \beta} \\ &= t_1 + \frac{\beta t_1}{\lambda x - \beta} \end{aligned} \quad (10-28)$$

而 $B(t_2)$ 是图 10-4 中以 b 为高, 以 t_2 为底的三解形的面积, 即我们有

$$\begin{aligned} B(t_2) &= \frac{1}{2} b t_2 \\ &= \frac{1}{2} b \left(t_1 + \frac{b}{\lambda x - \beta} \right) \\ &= \frac{1}{2} b t_1 + \frac{b^2}{2(\lambda x - \beta)} \end{aligned} \quad (10-29)$$

将式(10-27)和式(10-28)代入(10-24), 我们有

$$\begin{aligned} c(x) &= c_1 \left[\frac{b t_1}{2} + \frac{b^2}{2(\lambda x - \beta)} \right] + c_2 \left[x \left(\frac{b}{\lambda x - \beta} \right) \right] + c_3 x \\ &= \frac{c_1 b t_1}{2} + \frac{c_1 b^2}{2(\lambda x - \beta)} + \frac{c_2 b x}{\lambda x - \beta} + c_3 x \end{aligned} \quad (10-30)$$

这样, 该优化模型就归结为求 x , 以使由式(10-30)表示的 $c(x)$ 达到极小值的问题。

为使计算简化, 我们令

$$y = x - \beta/\lambda$$

于是我们有

$$c(y) = \left(\frac{c_1 b^2}{2\lambda} + \frac{c_2 \beta b}{\lambda^2} \right) \frac{1}{y} + c_3 y + c_0 \quad (10-31)$$

这里 c_0 是与 y 无关的一个常数, 由 $dc/dy=0$ 这一条件, 求出 $c(y)$ 的极值点为

$$y^* = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{c_1 b^2 \lambda + 2c_2 \beta b}{2c_3}} \quad (10-32)$$

于是 $c(x)$ 的极值点是

$$x^* = y^* + \beta/\lambda \quad (10-33)$$

式中的 x^* 就是为使总的生态 - 经济费用为最小且能满足可持续发展需要的应安排的种苗基地最合适的面积。

在具体应用时,只要通过某种方式得到式(10-33)右边各个量的估计值,就能算出要求的结果。

当然,同任何其他数学模型一样,总是在一定的假定初始条件、边界条件和其他有关条件下完成的。但由于实际问题不完全如假定的那么理想,所以必然有一定误差,在应用中逐步改进。

第七节 分布参数系统在畜牧生态经济控制中应用

在控制理论中,所研究的控制对象,有许多是由普通微分方程或差分方程所决定的控制系统。这种系统通常叫做集中参数系统,在它们当中,依时间、空间维数来定义系统的状态变量和控制变量。而分布参数系统则是用一组偏微分方程或差分方程来描述的。

与上述模型不同的用空间向量表示动物年龄的畜牧场动物头数的最优控制模型属于分布参数系统。它之所以是可用生态控制的模型之一,是因为畜牧场中,动物与动物的关系当然属于生物与生物关系的一种。生物与生物互为生态动力的源和汇。有了这样的模型,可改变原有牧业养殖经营中的感性认识状况,使这种控制决策走向理性认识,也是现代控制理论在生态控制中应用的一条新途径。了解了这种方法,当可在今后进一步推广到生态控制的许多其他领域。

一、基本原理

设 y 表示一维空间向量, t 表示时间, $x(t, y)$, 表示一维状态变量, 并设状态方程为

$$\frac{\partial x}{\partial t} = f(t, y, x, \frac{\partial x}{\partial y}, u) \tag{10-34}$$

这里 $t \in [0, T], y \in [0, h]$ 。现用 D 表示范围 $[0, T] \times [0, h]$, 并把它的边界 ∂D 分成两部分 Γ_1 和 Γ_2 , 如图 10-5 所示。在 Γ_1 部分的初始条件可描述为

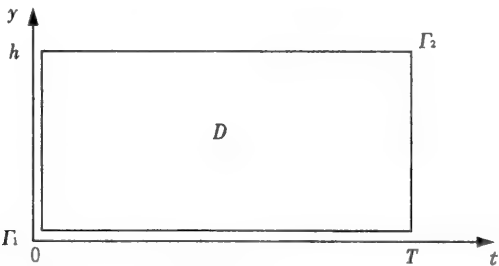


图 10-5 具有边界 Γ_1 和 Γ_2 的范围 D

$$x(0, y) = x_0(y) \tag{10-35}$$

$$x(t, 0) = v(t) \tag{10-36}$$

在式(10-35)中,函数 $x_0(y)$ 给出了 x 相对于空间坐标 y 的起始分布。在式(10-36)中,函数 $v(t)$ 表示在时刻 $t, y=0$ 时 x 的外部“增殖函数”。在畜牧场经营例子中,用 $v(t)$ 来度量在时间 t 最新出生的小牛的数量。考虑到相容性,显然应假定

$$x(0, 0) = x_0(0) = v(0) \tag{10-37}$$

令 $F(t, y, x, u)$ 表示: 在范围 D 上的 (t, y) 点上, 当

$$x(x, y) = x, u(t, y) = u$$

时的利润率; 令 $p(t)$ 为在时间 t 的 $x(t, h)$ 的一个单位值; 并设 $S(y)$ 为在时间 T 的 $x(T, y)$ 的一个单位值。则目标函数是:

$$\max_{u(t, y) \in \Omega} \{ J = \int_0^T \int_0^h F dy dt + \int_0^T P(t) x(t, h) dt + \int_0^h S(y) x(T, y) dy \} \quad (10-38)$$

式(10-38)中 Ω 是允许控制的集合。

二、在牧场生态控制中的应用

让我们用 t 表示时间, y 表示牲畜(比如说牛)的年龄, $x(t, y)$ 表示在时间 t 牧场中年龄为 y 的牲畜的头数。设 h 表示牲畜成熟期的年龄, 成熟期系指可屠宰的时期。这样, $[0, h]$ 是牲畜的一切可能年龄的集合。设 $u(t, y)$ 表示在时间 t 购进年龄为 y 的牲畜的速率。这里, 我们约定 u 的负值表示卖出。

为了研究过程的动态特征, 我们写出如下方程

$$x(t + \Delta t, y) = x(t, y - \Delta y) + u(t, y) \Delta t \quad (10-39)$$

从方程(10-39)的两边减去 $x(t, y)$, 再除以 Δt , 并取 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限, 便得状态方程

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{\partial x}{\partial y} + u \quad (10-40)$$

关于 x 的边界条件, 由方程(10-35)~(10-37)给出。这里 $x_0(v)$ 表示各种不同年龄牲畜的初始分布, $v(t)$ 表示由外部各因素确定的繁殖率。

为了研究牧场管理者的目标函数, 这里用 T 表示终端时间。用 $P(t, y)$ 表示在时刻 t 年龄为 y 的牲畜的购进或销售价格。用 $P(t, h) = Q(t)$ 表示在时刻 t 的屠宰价值, 并设 $P(t, y) = S(y)$ 表示在时间 t , 年龄为 y 的牲畜的残值, 函数 Q 和 S 表示牧场的收入。为了求出利润函数, 必须从收入中减去牧场的经营成本。设 $C(y)$ 表示: 每单位时间, 对年龄为 y 的牲畜的喂养(含饲料)的成本。用 $\bar{u}(t, y)$ 表示在时刻 t 年龄为 y 的牲畜购进的“目标值”对于此目标值的任何偏差都要付出代价, 并由

$$q[u(t, y) - \bar{u}(t, y)]^2$$

给出偏差的罚成本, 这里 q 是常数。因此, 利润极大值目标函数为

$$J = \int_0^T \int_0^h -[q(u - \bar{u})^2 + C(y)x + Pu] dy dt + \int_0^T Q(t)x(t, h) dt + \int_0^h S(y)x(T, y) dy \quad (10-41)$$

以此式与式(10-38)作比较, 可以得出

$$F = -[q(u - \bar{u})^2 + C(y)x]$$

现假定 $\Omega = E^1$, 这意味着控制变量是不受约束的。

为求解此问题, 先构成如下的 Hamilton 函数:

$$H = -[q(u - \bar{u})^2 + C(y)x + Pu] + \lambda \left(-\frac{\partial x}{\partial y} + u \right) \quad (10-42)$$

式中的伴随函数 λ 满足

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -\frac{\partial \lambda}{\partial y} + C(y) \quad (10-43)$$

并满足 D 域边界 Γ_2 部分(见图 10-4)规定的 λ 的边界条件。

为使 Hamilton 函数为极大,将 H 对 u 进行微商,并令其等于零,得:

$$u^*(t, y) + \frac{1}{2q} [\lambda(t, y) - P(t, y)] \quad (10-44)$$

为了计算 u^* , 必须解出 $\lambda(t, y)$ 。经证明,式(10-43)的通解形式是:

$$\lambda(t, y) = - \int_y^k C(\tau) d\tau + g(t - y) \quad (10-45)$$

这里 g 是任意单变量函数, k 是在区间 $[y, h]$ 中的常数。可利用边界条件确定 g 和 k 。

为了叙述对 λ (以后对 x) 的显式解,把图 10-5 中的域 D 划分为三个区域 D_1, D_2 和 D_3 (见图 10-6)。从 $(0, 0)$ 至 (h, h) 的与底边呈 45° 角的线,位于 D_1 和 D_2 之间。从 t 轴

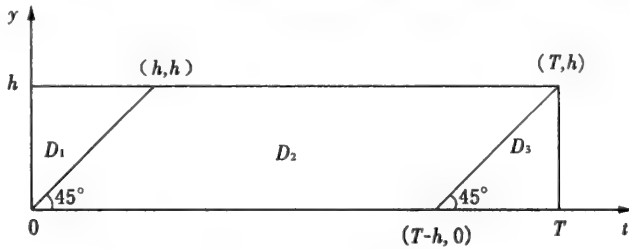


图 10-6 D 的三个区域的划分

的 $(T-h, 0)$ 至 (T, h) 的 45° 线,位于 D_2 至 D_3 之间。因此, D_1, D_2 和 D_3 是闭集。这些 45° 线对解 λ 是很重要的,其原因在于:任意函数的确定都与 $(t - y)$ 有关。利用分布参数的极大值原理得到在 $D_1 \cup D_2$ 域上的 $\lambda(t, y)$, 并通过推导,得到

$$\lambda(t, h) = - \int_h^k C(\tau) d\tau + g(t - h) = Q(t)$$

因此,必须有 $k = h$ 和 $g(t - y) = Q(t - y + h)$ 。

对于域 D_3 , 我们有:

$$\lambda(T, y) = - \int_y^k C(\tau) d\tau + g(T - y) = S(y)$$

当 $t = T$ 时,要使积分成为零,必须有

$$k = T - t + y$$

和

$$g(t - y) = S(T - t + y)$$

值得注意的是:

$$\lambda(T, h) = P(T, h) = Q(T) = S(h)$$

于是,我们可以写出 λ 的如下完整解:

$$\lambda(t, y) = \begin{cases} Q(t - y + h) - \int_y^h C(\tau) d\tau & \text{对于 } (t, y) \in D_1 \cup D_2 \\ S(T - t + y) - \int_y^{(T-t+y)} C(\tau) d\tau & \text{对于 } (t, y) \in D_3 \end{cases} \quad (10-46)$$

用类似的方法可得到 x 的解。将式(10-44)代入式(10-40),并利用式(10-35)至式(10-37)的边界条件,得到 x 的完整解;

$$x(t, y) = \begin{cases} x_0(y - t) + \int_0^t u^*(\tau, y - t + \tau) d\tau & \text{对于 } (t, y) \in D_1 \\ v(t - y) + \int_0^y u^*(t - y + \tau, \tau) d\tau & \text{对于 } (t, y) \in D_2 \cup D_3 \end{cases} \quad (10-47)$$

在域 D_1 上,可以把式(10-47)的解解释为“起始策略”,它完全由初始分布来表征。也可以把在域 D_3 上的解,即式(10-46)的解解释为“终端策略”,因为在这个区域内牲畜

没有成熟,但在到达终端时间 T 的时候,所饲养的牲畜全都要卖出。式(10-46)中的第一表达式和式(10-47)中的第二表达式,都处于域 D_2 内,可把它们解释为解的“中间策略”部分。

第八节 生态-经济工程随机微分控制

生态经济工程优化控制是生态建设中的一个重要而复杂的控制问题。历史上生态建设大小项目的成败,无不与之有关。尤其是像开荒引起黑风暴、水工建设未注意生态控制而引起的重大失误,使人们宁可花大力气研究这样的问题。但在历史上,由于缺少用数学解决问题的优化控制手段,进行生态优化控制只能是定性的,主观的,这样下去,难免重蹈“失误”的覆辙。因而有必要研究优化控制手段问题。

一、问题的提出

实施生态-经济工程总是要投资的。投资按其应用项目的特点可以分为两种:一种是只计生态效益,不考虑相当一段时间(可以是几十年)内的经济收益,这种投资是不担风险的,比如大面积农田防护林工程;草原改造工程;森林公园或城市园林内草坪建设等,当然从生态经济原理可知,长远生态效益也是可用经济表示的。并且可以用《生态动力学》第十一章所介绍的方法计算出来。另一种是既考虑生态效益又考虑经济效益,如盐碱地改良工程,防风网建设工程,防霜堤建设或填平霜穴的改良地势工程等,这些是有风险的,比如填平霜穴工程旨在改良柑橘生态环境,防止“霜打洼地”,但投资建设后也可能在经济上不合算,长期收不回成本。也可能因为品种的改良,柑橘耐低温能力提高了,即使填平霜穴,因霜减产幅度也不会太大;也可能市场行情有变化,以致不能按施工前期那样,及时收回成本。后一种情形即用于生态控制的带有随机性的生态-经济工程。

假设生态-经济建设的投资者,同时考虑无风险投资和风险投资,欲求每个时刻的投资比例。这个问题的客观决策,不是用简单的统计方法能够完成的。据随机过程的原理,须用随机微分方程求解这类生态-经济的随机控制问题的求解方法。

二、模拟设计原理

设有生态-经济建设资金 x 万元,在不考虑追加或挪为他用的条件下,问有每个时刻 t (连续时间)以什么比例投资于无风险和有风险这两类生态-经济建设项目,可使这些投资在时刻 T 的时候,获得的生态经济效益最大?

在时刻 $t=0$ 时的资金 x ,把它用于两种生态建设项目。设在任意 $t < T$ 时,分别以 u_t 与 $1-u_t$ 的比例($0 \leq u_t \leq 1$),投资有风险与无风险的生态建设项目。这样,使在时刻 t 的生态财富——按经济核算的生态实力储备,我们谓之生态财富,如甲县有防护林 $m \text{ km}^2$,乙县有 $n \text{ km}^2$,每 km^2 林地的生态经济储备当量为 5 万元;甲县有草场 $m' \text{ km}^2$,乙县有 $n' \text{ km}^2$,每 km^2 的草地的生态经济储备当量为 2 万元,并且除林、草外,无其他生态储备。那么,甲县生态财富为 $5m + 2m'$,乙县为 $5n + 2n'$ ——总值为 ξ ($\xi_0 = x$)。设无风险投资的利率为 r (>0),有风险投资的利率为 b ($>r$)并具有随机波动风险,假定这种随机波动风险可用 Brown 运动来表达。这样,可以采用如下的随机微分方程模型来描述时刻 t 的生态财富 ξ_t :

$$\begin{cases} d\xi_s = u_s \xi_s (b ds + \sigma dB_s) + (1 - u_s) \xi_s r ds & (s > 0) \\ \xi_0 = x & (0 \leq u_s \leq 1) \end{cases} \quad (10-48)$$

式中, r, b, σ 都是非负常数, $b > r$, $\{B_t : t \geq 0\}$ 是 Brown 运动。

我们的目标是:“控制” u_s , 使它达某个固定的平均生态财富, 即 ξ_T 的数学期望 $E\xi_T = \max$ (或者较一般地说, 对某一目标函数 $\varphi(x)$, 能够使 $E\varphi(\xi_T) = \max$)。

注意到 σ 可以被理解为一种生态建设的“风险随机波动率”, 当 B_t 取绝对值很大的负值时, 投资者就会有大的损失, 这里就是一个随机过程, 如果 ξ_s 首次达到零的随机时间为 τ_0 , 那么投资过程到 τ_0 必须终止, 因为此时, 投资者资金所致生态财富业已耗尽。所以目标应改为选取 u_s , 使 $E\xi_{T \wedge \tau_0} = \max$ 。

对于 u_s , 除了取值在 $[0, 1]$ 内的限制条件以外, 它应当依赖于随机过程 $\{\xi_t : t \geq 0\}$ 而且只依赖于 ξ 的过去的值而不依赖于 ξ 的将来的值。

这一类问题与隐 Марков 模型的随机决策基本类似, 所不同的只是: 这里研究的 ξ_t 属于连续时间连续状态的情形。这时则有一个由随机微分方程决定的随机系统, 其中包含一个可控制的因素 μ 。

三、最佳方案确定过程和结果

假定

$$\varphi(x) = x^\alpha \quad (0 < \alpha < 1)$$

(其实合理的假设是 $\alpha = 1$, 但是那样做, 不易求解, 故只好假定 $\alpha < 1$), 令

$$V(t, x) = \sup_{u \in U_M} (E \xi_{t_1 \wedge \tau_0}^u)$$

据文献 (Tijms, 1994; 钱敏平等, 1997), 须试解抛物线型 HJB 方程的终值边值问题

$$\begin{aligned} \sup_{0 \leq v \leq 1} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 x^2 \sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + [bv + r(1-v)]x \frac{\partial V}{\partial x} \right) &= 0 \\ V(t, x) &= x^\alpha, V(t, 0) = 0 \quad (t \leq t_1) \end{aligned} \quad (10-49)$$

式(10-49)左边等于

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \sup_{0 \leq v \leq 1} \left[\frac{1}{2} x^2 \sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \left\{ v^2 + \left[\frac{\alpha(b-r)}{-x\sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}} \frac{\partial V}{\partial x} \right] v \right\} \right] + rx \frac{\partial V}{\partial x}$$

要使方括号内达到最大, 有下述三种可能:

第一种是:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} > 0$$

此时有: $v = 0$ 时达最大, 这样式(10-49)变为

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} + rx \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ V(t, x) = x^\alpha, V(t, 0) = 0 \quad (t \leq t_1) \end{cases}$$

第二种是 $\partial^2 V / \partial x^2$ 可正可负, 这种情形较为复杂。由于我们只要求一个正解, 所以没有讨论它的必要。

第三种是

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} < 0$$

此时上式方括号内项在

$$v^* = -(b-r) \frac{\frac{\partial V}{\partial x}}{x\sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}} \quad (\text{记成 } f(t, x))$$

必取值最大,又由于我们要求

$$0 \leq v \leq 1$$

从 $v^* \geq 0$ 及 $b > r$, 我们可以看出:要使式(10-49)有解,就必须要求

$$\frac{\partial V}{\partial x} \geq 0$$

于是式(10-49)中的第一式变为如下的表达式

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2}(v^*)^2 x^2 \sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + (r + (b-r)v^*)x \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

由 v^* 的表达式,我们可以推出式(10-49)等价于

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} + rx \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{(b-r)^2 \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2}{2\sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}} = 0 \\ V(t, x) = x^\alpha, V(t, 0) = 0 \end{cases} \quad (10-50)$$

这是一个非线性方程的终边值问题。现试探该方程有形式为

$$V(t, x) = h(t)x^\beta$$

的解的可能性。将上述试探解形式代入式(10-50),便得出

$$\beta = \alpha, h(t) = \exp\left[\left(rd - \frac{(b-r)^2 \alpha}{2\sigma^2(1-\alpha)}\right)(t_1 - t)\right] \stackrel{\text{记成}}{=} \exp[\lambda(t_1 - t)] \quad (0 < \alpha < 1)$$

即

$$V(t, x) = \exp[\lambda(t_1 - t)]x^\alpha$$

从而

$$f(t, x) = \frac{-(b-r) \frac{\partial V}{\partial x}}{x\sigma^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}} = \frac{b-r}{\sigma^2(1-\alpha)}$$

根据 Bernt Oksenda1(1989)书中求最优控制策略的定理,这说明只要

$$\frac{b-r}{\sigma^2(1-\alpha)} < 1$$

控制量 u_t 就满足

$$0 < u_t < 1$$

而且最优 Марков 控制就是以下常值控制

$$u_t^* \equiv \frac{b-r}{\sigma^2(1-\alpha)}$$

此时 V 满足以上一切要求,即在

$$0 < x < \infty$$

中有

$$\frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} < 0$$

及

$$\frac{\partial V}{\partial x} > 0$$

控制量 u_s^* 满足

$$0 < u_s^* < 1$$

这就是说,如果时刻 t 有资金 x ,在任意时刻 $s > t$,只要

$$\frac{b-r}{\sigma^2(1-\alpha)} < 1$$

如果用资金的

$$\frac{b-r}{\sigma^2(1-\alpha)}$$

部分投资有风险的生态建设工程,而以其余部分投入无风险的生态建设工程,那么在用价值函数

$$\varphi(x) = x^\alpha \quad (0 < \alpha < 1)$$

作资金评估的条件下,在时刻 t_1 ,平均获益为

$$e^{\lambda(t_1-t)} x^\alpha$$

为最大获益。

以上的公式,很容易用于实际生态工程之中。当然,那首先需收集如第三章所述的各种必要的生态控制信息。其次要求按一定时期的不变价作适当经济评估。

第九节 GIS 在植被可持续发展管理中应用

本书的第一章和第三章,我们曾经从生态控制的信息基础的角度,提到过地理信息系统(GIS)。其实用性正以前所未有的速度进展,这种情形的部分原因,是许多问题与地理学有关。生态控制,尤其是宏观控制,与地理学关系密切,所以 GIS 在生态控制中的应用是十分广泛的。其中,最重要的是植被基础的宏观管理和监控,因为这是一定范围乃至全球的生命、经济可持续发展的基本需要。本节将概括论述在生态问题中应用的几个方面。并举一简例说明。

什么是地理信息系统呢?尽管目前尚未有十分一致的共识,但一般认为它是一门集计算机科学、信息学、地理学等多门学科为一体的一门新兴学科,是在计算机软件 and 硬件支持下,运用系统工程和信息科学理论、科学管理和综合分析具有空间内涵的地理数据,以提供对规划、管理、决策和研究所需信息的空间信息系统。尽管 GIS 始于 40 多年前,在我国有 20 多年历史,但其基本思想起源于 2500 多年前人们在探险和研究中的自动化概念与原理。由于在地理信息系统中涉及到丛林、沼泽、平原,涉及植物分布和土地利用状况等,而这些都是研究可持续发展时必需考虑的,所以地理信息系统在生态保护中的意义,是很容易理解的。其实,地理信息系统已在生态保护中应用,并随着技术发展,经济建设和生态建设的深入,它的应用领域将继续拓展。

一、应用领域概述

先简述其应用领域。

1. 在土地管理中的作用

Mac Eachren(1995)指出:传统的地图概念是用作通讯的运载工具,旨在表示空间的一种具体信息,地图未有充分地反映赖以显示空间数据的较复杂的方式。GIS的作用在于它作为环境模造和决策支持工具,能反映复杂的相互作用情况,而不同意见者可相互研究。

2. 地图绘制

一切土地管理工作的基础是了解资源状态。尽管来自航空摄影等方面的空间信息是服务于该目的的常用工具,但为土地评价计划和管理的许多方面提供极为方便的,则是GIS的数学形式的编码空间信息。GIS功能之一是将有关数据及时绘成地图,例如将天气站观测点记录的雨量内插成为连续的降水曲面或者从测量高度值生成坡度值。

3. 测量与监视

GIS利用其以数字形式表示的动态信息,能帮助被保护地区计划工作者和研究者,了解景观要素的结构和功能,以及它们之间的空间关系。例如,景观生态学方面的文献引进有助于这方面分析的生态学指标。利用有关的信息特征,生态群落的规模、类型、图像和范围,可以被确定下来,它们对一个地区内种群的潜在影响,可以被评估出来。

监视是被保护区管理中的一个关键问题,因为它提供了关于政策作用(可视为一种人工生态动力源)的反馈。虽然有规则的监视计划,显然是管理者清楚认识到的,但是数据重复收集编码和内插,可能对信息真实性有所影响。

4. 模造和管理

分类表达技术和景观生态度量方法,可以帮助研究者了解物理和人类环境,与此同时,GIS在环境模造中应用,为决策支持提供描述和预测工具。环境模造,按照确定的算法,将空间信息结合到近似模拟真实世界关系的尝试之中。这类模造对土地管理者是极为有用的,它有能力为构造完全的、多标准、多目标的决策支持。

借助GIS模式,用公式于土地管理决策,涉及到相互间有作用的开发技术,而常规的地图应用却没有这样的作用。

二、个例分析:墨西哥 Manantlán 山区生物圈保护

这里介绍的是较全面运用GIS于区域可持续发展的实际例子。墨西哥 Manantlán 山区生物圈保护地(简记SMBR)位于 Jalisco 和 Calima 中西部的州(图10-7)。从生态学上来说,139577hm²的保护地带位于两个生物地理省份——the Neartic 和 the Neotropic——的过渡地带。这一过渡形成具有多样性植物区系和动物区系的生态系统阵列。植被类型包括:热带落叶林、热带次生落叶林、橡树林、松—橡混交林、松树林、冷杉林、山地中生林、次生植被和放牧地。近2900种维管束植物,已在 Manantlán 山区被鉴别出来。

SMBR 展示不同使用制度,包括私有土地和公用土地。大约只有7000人生活在保护区,而在保护区附近靠保护区资源生活的人则很多。在最近40年间,由于伐木、持续农耕以及过度放牧,SMBR 受到影响。

(1)绘制地图:构造并持续绘制空间资源目录表

创制数字化的功能资源目录表,需要做大量的计划和组织工作,以搜集适当的数据,

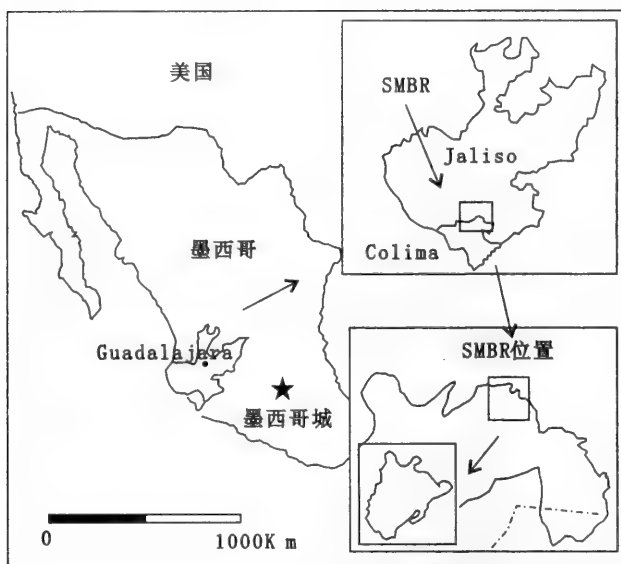


图 10-7 SMBR 位置

输入的方法是标准化的,数据库合乎要求,便于用户操作。构造这样的目录表显然须耗资,以便购买硬件、软件,培训人员并收集和输入数据。但令人兴奋的是目前计算机设备价格在下降,功能却日益完善。

现在 GIS,已运行 5 a 时间。土壤、地貌、地质等数据由政府有关部门提供,专门数据系根据野外研究获取而输入。更多的数据是由环境试验所得,如降水、坡度廓线、坡地长度。以上数据是创制 GIS 模式的基础。

(2) 监测与测量:考察图像,调查毁林程度

众所周知,植被是环境变化的一个敏感的指标。反映在植被镶嵌图上的植被状况——或者是自然影响形成的,或者是人工干扰造成的——可能是难以捉摸的,也可能是显而易见的;可能是季节性的,也可能是临时性的。考察一定时间内的土地覆被状况,可能有助于了解自然发生的过程和人类活动的作用,以及这些对生态条件的影响。我们在第三章讲述了遥感资料对生态控制的信息基础作用,对于土地覆被的变化来说,用遥感资料进行研究,是很适宜的,因为遥感技术能够反复地提供从局地尺度到全球尺度的一致的用数字表达的测量结果。

在过去,墨西哥的热带边缘森林,是人们不了解的生物多样性的隐蔽处所。尽管这些森林保持其天然的特性,生物多样性显著,但是,SMBR 还不能认为那里是原生的天然林区。而据 Jardel 等的研究,该区域显然曾受到人类活动的影响。为定量地鉴别、监测这些变化,SMBR 绘出 1970 年的 1:50000 地图(图 10-8a),给出 1995 年卫星影像图(图 10-8b),以寻求生态敏感的主要部位,图的分辨率是 25 m^2 。通过对比分析,揭示出 25a 间陆地植被和土地利用方面的几个趋势特征。其中重要的是:该保护区内的土地利用型尚未发生显著变化;然而,几种活动(例如农业和牧业)的范围,已显著增加(图 10-8c)。令人震惊的是在许多地方存在着毁林活动,这是 SMBR 土地利用计划才能监测出来的。

(3) 模造:土壤侵蚀潜势的估计

鉴于 SMBR 土地利用动态性,决定了人们有必要模造“农牧业活动对土壤侵蚀的影响”。SMBR 土壤侵蚀潜势(地)图,是用 GIS 积分的订正的土壤损失通用方程(RUSLE)

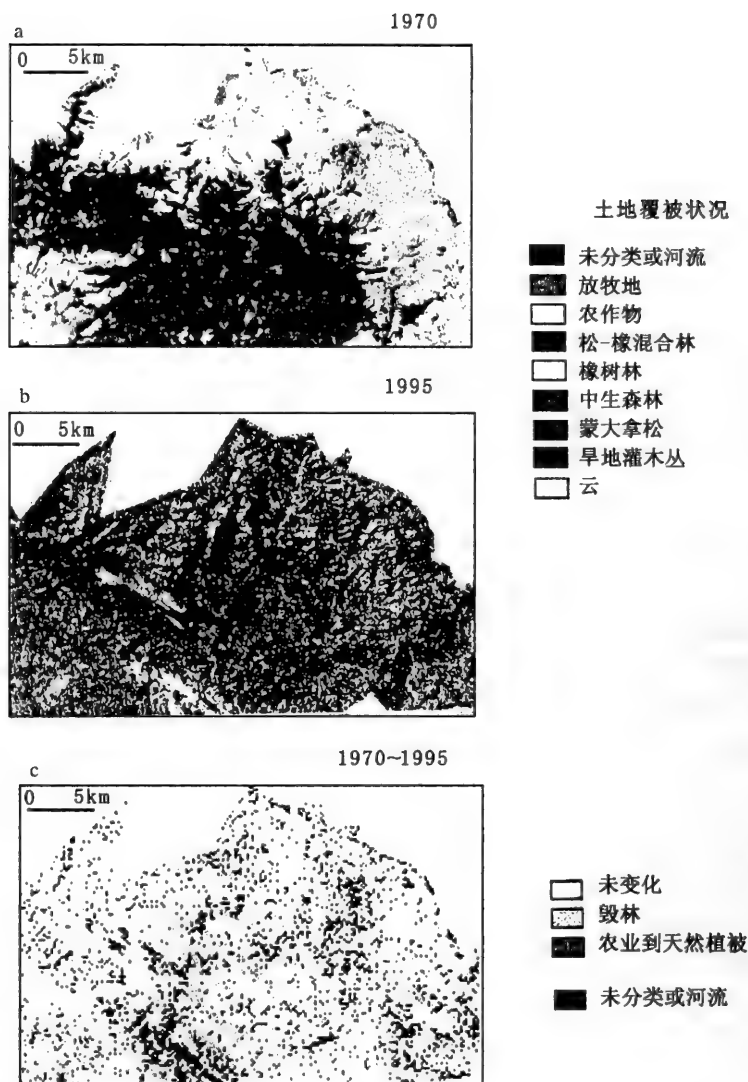


图 10-8 SMBR 中心部位植被变化的空间图像

给出的结果绘制的。

结构定位,相互关联,土壤保护等,需要表达生物圈特征的初始地图,这里所说的生物圈特征包括土壤类型、土地覆被和利用状况、降水量和地貌,实质上涵盖了许多非生物性质的生态动力源要素。用于生成变量的资料包括陆地资源卫星影像,由此可推导出地被物的即时状况,可以绘出数字化的地貌和土壤图,可以列出降水量表。对许多资料,经模式处理运算可得出干、湿季节的土壤侵蚀图(如图 10-9)。

由于环境变化和人类活动的影响,土地覆被、土地利用和小气候条件在变化着。这样一来,影响土壤侵蚀的环境条件是不稳定的。因而,对土壤侵蚀潜势及其空间分布变化的监测,对土地管理者了解有关过程来说是必需的。关于热带毁林对农业的影响,虽然为人们普遍了解,并有文献记录,但是有关历史资料是很少的。然而,如 Hessburg 等(1999)所指出的那样,关于过去条件的知识,可促进对目前过程的了解。这对于生态控

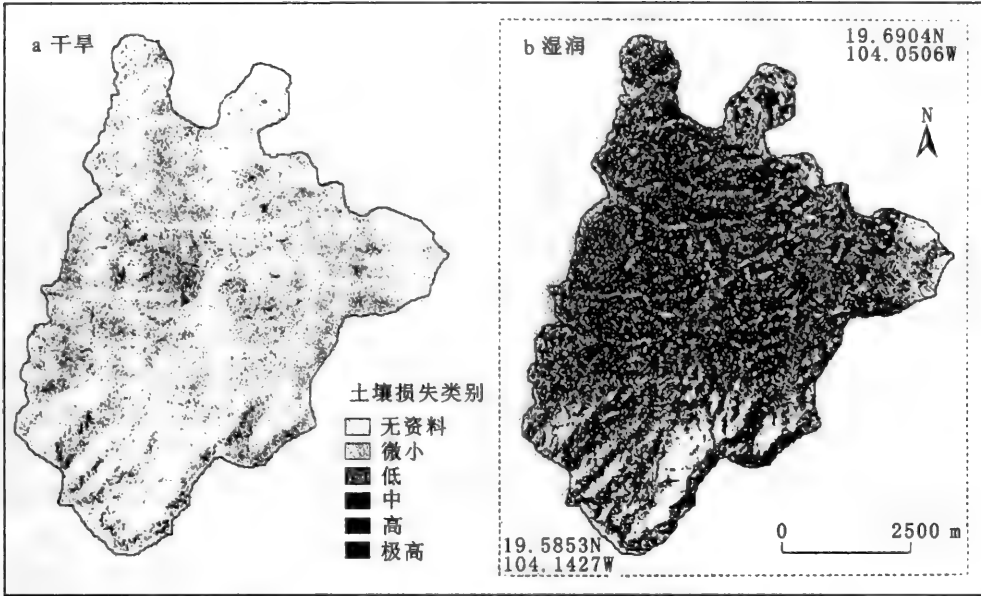


图 10-9 GIS 模造工具:土壤侵蚀区显著性的分辨

制的决策,无疑是有用的。这样,不仅能够更有效地监测土壤侵蚀潜势,而且能够监测许多有关的生物特性,致使 GIS 基础的管理模式得以实施。根据 2001 年的报道,利用以 GIS 为基础的土壤侵蚀潜势模式,也能用于土壤保护计划,并已经做了许多工作。

(4) 土地管理问题

像土壤侵蚀潜势这样一些关于土地自然特征和过程的模式,对土地管理者来说,会起到有价值的帮助作用。保护区居民社会和经济需求,在任何可靠的决策过程中,也必须考虑进去。在 2000 年制定的保护管理计划 SEMARNAP,限制在某些区域土地的利用方式,比如牛的放牧被限制在核心区,当地农牧场主对牧场、农田用地的需求量越来越多,这同保护政策相悖。这个例子说明:以 GIS 为基础的多目标土地分配模式(MOLA),在有效利用土地计划方面是有用的。它可以使土地利用的生态控制合理化,即我们常说的宜农则农,宜林则林,宜牧则牧。如果没有 GIS 及其衍生的一系列模式的形成,往往人们所理解的“宜”字,具有很大程度主观性,甚至无法说明这个“宜”的含义,乃至导致脱离客观规律的错误决策,使生态动力功能减弱,遭到农、林、牧业之生态动力源严重破坏的惩罚;而在 GIS 的一系列研究的基础上的客观决策,正是由可持续发展这一根本目标出发,在“宜”字上大作文章。

说到目标,除论及可持续发展这一根本的总体目标,还必须详细研究某些具体目标。因为总体目标一般必须由若干具体目标的实现,才能得到保障。在 GIS 的作用中,除牧场、作物和被保护区的可利用地图之外,模式的应用,需要鉴别各种用途的土地利用目标。这样的目标的确定,需要有当地的各方面知识和经验。不同阶层的人,对土地最优利用的要求,一般是不同的——农牧场全偏向于放牧的权重较大,保护机关的官员则侧重于保护。在模式中,土地利用目标不只就经济利用(放牧、农耕)而确定,也要考虑到长远的保护与可持续发展。土地利用目标的可持续性涉及到几个变量;关于农作物的要求,目标在于玉米年生产量、土地的平均生产力以及总人口。用于多目标土地分配模式

的流程图已被研制出来(Mersey,2002)。

三、在我国的应用与展望

我国的地理信息系统,从开始研制到现在大约有一二十年的历史。充分发挥其在可持续发展中的作用,现已迫在眉睫。从GIS在土地管理中的应用,比如从墨西哥部分地区应用来看,学习那里的经验和方法,是有必要的。我国和墨西哥同属发展中国家,又都很重视农业。面临可持续发展的许多问题,可相互借鉴。由于我国地域辽阔,生态条件千差万别,所以宜选择不同地理环境分别找出试点地区,加以研究;而目前,为西部开发服务的可持续土地利用研究与实践更显得重要。

从可行性来说,我国已经建立起GIS,这为充实生态因子和有关信息提供了基础设备条件。其次,我国从事实际技术的农林牧渔工作者以及农牧渔民与林业工人,有着极其丰富的经验,当务之急是把这些经验搜集起来,增加信息量,并用本书第九章所述的智能控制手段加以整理提高,输入到GIS,为目标、权重的确定,为生态模拟客观化服务,从而为优化土地管理设计出切实可行的方案。

从人力条件说,近20年来,我国培养了一大批生态、地理专业人才,这是1979年以前无法比拟的,他们在为可持续发展服务。此外,许多非地理、生态工作者,如气象、水文、生物、农林牧渔以及数学、物理、化学、计算机工作者,近年来生态意识大大增强,从自己专业出发,为生态建设和可持续发展服务。这和20多年前,只有华罗庚、王元、宋健等数学名家著作中体现出为生态方程求解等基础科学与生物科学关联的情形相比,确有长足进展,正像陈兰荪研究员在《生物数学学报》上介绍那样。

从物质方面,计算机及其相关设备基本能满足工作需要,国家投资经费逐年增加,非常有利于GIS的提高与普及。

当然,与发达国家相比,我们的GIS起步毕竟迟了20多年。在追赶的同时,要结合国情创新,使GIS在促进可持续发展中起到越来越大的作用。

参 考 文 献

- 石青云. 2001. 石青云文集. 北京:北京大学出版社.
- 石树文等. 2002. 盐城自然保护区两种人工湿地模式评价. 生态学报, 20:760~765.
- 布罗依尔. 1987. 人工影响天气的现状和前景. 于系民、袁国恩译. 北京:气象出版社.
- 辽宁省林业土壤研究所. 1976. 树木与环境保护. 沈阳:辽宁人民出版社.
- 华罗庚、王元. 1978. 数论在近似分析中的应用. 北京:科学出版社.
- 杨小波等. 2002. 城市生态学. 北京:科学出版社.
- 杨士弘等. 2001. 城市生态环境学. 北京:科学出版社.
- 赵道胜. 1995. 森林资源经营管理模型的建立与应用. 北京:中国林业出版社.
- 钱敏平、龚光鲁. 1997. 随机过程论. 北京:北京大学出版社.
- 梁兴权等. 2001. 城市林业. 北京:中国林业出版社.
- 蓝盛芳等. 2002. 生态经济系统能值分析. 北京:化学工业出版社. 北京:环境科学工程出版中心.
- 福里斯特. 1986. 系统原理. 王汉斌译. 北京:清华大学出版社.
- Abreu, L. S. 1994. *Impactos Sociais Ambientais na Agricultura: uma Abordagem Bistorica de um Estudo de Caso* (Embrapa/SPI: Brasilia, PF).

- Aide, T. M. , Zimmerman, J. K. , Herrera, L. , Rosario, M. and Serrano, M. 1995. Forest recovery in abandoned tropical pastures of Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* , **77**: 77~86.
- Howard, A. F. 1991. A critical look at multiple criteria decision making techniques with reference to forestry applications. *Canadian Journal of Forest Research* , **21**:1649~1659.
- Memers, M. N. 2000. *Fundamental of Geographic Information System* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Miranda, J. I. 1999. *Evaluating Sustainable Agriculture with Multicriteria Analysis: the Case of Guadalajara, Sp. Doctoral Dissertation*. Worcester, MA: Clark University.
- Merseg, J. E. , Andrew, A. M. and Luis, M. M. 2002. Realizing the potential of GIS in community - based management of protected areas. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* , **9**: 208~222.
- Odum, H. T. 1983. *System Ecology: An Introduction*. New York: Wiley.
- Odum, H. T. 1996. *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making*. New York: Wiley.
- Oksendal, B. 1989. *Stochastic Differential Equations, An Introduction with Applications*. Berlin: Springer - vorlag.
- Panziri, M. *et al.* 2000. Importance of the *brady - rizobium japonicum* symbiosis for the sustainability of a soybean cultivation. *Ecological Modelling* , **135**: 301~310.
- Sessburg. P. F. , Smith, B. G. and Salter, R. B. 1999. Detecting change in forest spatial pattern from reference conditions. *Ecological Applications* , **9**: 1232~1252.
- Sethi, S. P. and Thompson, G. L. 1981. *Optimal Control Theory - Applications to Management Science*. Boston Martinus Nijhoff Publishing.
- Tijms, H. C. 1994. *Stochastic Models, An Algorithmic Approach*. New York: John Wiley & Sons.
- Ulgianti, S. *et al.* 1994. Energy use, environmental loading and sustainability: an energy analysis of Italy. *Ecological Modelling* , **73**: 215~269.
- Ulgianti, S. *et al.* 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural man - made ecosystems. *Ecological Modelling* , **108**: 23~36.
- Wilks, D. S. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. San Diego, CA: Academic Press, Inc. .
- Zinck, J. A. and Farshad, A. 1995. Issues of sustainability and sustainable land management. *Canadian Journal of Soil Science* , **75**:407~412.

第十一章 生态大系统与巨系统控制

在现有关于控制论的许多著作中,把控制论分为经典控制论、现代控制理论和大系统控制理论三个方面,也有人称之为三个阶段即三个里程碑。但自 1989 年,开放复杂巨系统方法论提出以来,这实际是控制论的第四个阶段——巨系统控制阶段或说第四个里程碑。由于大系统、巨系统的连贯性和难以准确分割的特点以及在生态控制中,处理它们的复杂性,致使我们专列一章,统一论述。

第一节 大系统巨系统生态控制——生态控制发展新阶段

生态控制原理的发展阶段,一般被认为是跟随着控制论的几个发展阶段。当然,在控制论产生以来,生态控制原理受这一现代数学理论的支持并运用其方法,是毋庸置疑的。比如在 1948 年当 Wiener 名著 *Cybernetics* 一书出版以后,以及后来的《工程控制论》都是建设生态控制原理的理论依据之一。但事实上,虽然起初未涉及 *Cybernetics*,但饶有控制意义的生态控制原理,可以说早在 20 世纪 20 年代就已存在,这可以 Lotka-Volterra 方程的发表作为起点。但从生态控制原理的形成过程看,尚可认为与早期的经典控制论同步。因为在 Wiener 的书出版之前,虽没有经典控制论这一学科,但也客观上存在着经典控制论的许多分散研究,这从 Wiener 的原著列出的大量文献可以证明。

作为第一阶段是生态控制原理的经典阶段,可认为是 20 世纪 50 年代以前的工作。而现代控制理论的产生,从 20 世纪 60 年代开始至 70 年代中期,为控制理论应用于生态控制的阶段,一般是生态工作者自觉应用控制理论,开始是很初步的,大约到 20 世纪 80 年代开始走向成熟,说明有相当的时间滞后性,而真正用得较好,是在 90 年代,所以说第二阶段产生在 20 世纪 60 年代,发展于 80 年代,成熟于 90 年代。

第三个阶段是大系统理论在生态控制中应用,可以说初步产生于 1976 年,以国际自动控制联合会召开的“大系统理论及应用”的专题讨论会为起点,这是工程控制论开始进入大系统理论阶段的标志。在生态控制方面的工作,也纳入大系统理论的整个体系之中。

第四阶段是以钱学森 1989 年提出复杂巨系统方法论为起点的。这是控制论总体发展的第四个里程碑,并直到现在正处于发展初期。在钱学森创建该方法不久,在生态控制中即迅速应用。

正确处理这四个阶段的关系,是很重要的。首先,不管哪个阶段创建于何时,只要所提出的问题有科学意义,或有实用价值,或兼而有之,都应不断研究,设法应用,并在应用研究中提高。就好比说,欧几里德几何学距今 2000 多年,牛顿—莱布尼兹的微积分距今 300 多年,伽罗华理论、阿贝尔群距今 170 多年,各学科对其应用现在仍在研究,并不断推广。对于经典的属于第一、二阶段的生态控制原理,不能束之高阁,所以必须如此,是因为生态控制原理的发展,也和许多学科一样永无止境。如我们在第二章所讲述的生态控制的数学、物理学、化学、生物学和地学基础是在发展的,在第三章所讲的信息,也是在进

步的。所以生态控制原理的研究,必须同它们一起向前发展,不断进步,才能满足可持续发展需求。另一方面,面向新的阶段在大系统和巨系统阶段,处理许多问题,也离不开经典阶段的原理、方法。有些暂时未用上,那是因为认识水平所限,相信将来会用得更多些。

在应用的同时,建立淘汰机制,是必要的。因为在研究中,如果发现过去的某些经典研究不适用,则必须在认清之后淘汰。比如,在若干年前,有人在研究天文—地球—生物关系时,曾经提出太阳黑子的 11 a 周期导致地球大气运动的 11 a 周期,进而地球大气引起的旱涝 11 a 周期导致某些昆虫发生的 11 a 周期,但经实践证实这种关系是不存在的,所以像这样天—地—一生的研究“成果”被及时淘汰是理所应当的。又如过去曾有人认为中国的黏虫都是在当地发生的,并不迁飞,这样在黏虫控制中,只要控制当地的土壤、水文等生态条件就可以了,而不必把黏虫的活动与大气环流结合起来。但经试验证实,迁飞是受空气流动的支配的客观存在的规律,于是纠正了“不飞论”而把迁飞与大气环流结合起来研究,依其规律加以生态控制,效果良好。

在对大系统和巨系统的生态控制研究中,应遵循的不宜是套用经典和控制理论的方法,也不能脱离具体条件,牵强应用其模型。由于系统巨大,应用反映渐变的微积分、概率论等显得困难了,即使新创建的像突变论、协同学,耗散结构往往也只是起到某种描述的作用。当然,那是不可少的。随着科学发展和技术进步,应随时考虑新提出的一些基础原理,尤其是数学上的新进展的应用。从技术上来说,像 GIS, Internet, 遥感图像等为大系统和巨系统的研究,提供了支持。

在实践中,提炼大系统、巨系统研究的课题,包括若干子课题,并寻求解决办法,是这类研究的第一阶段。而在取得一定基本成果后,及时中试或应用,是必要的,从中决定应该继续研究什么,应该淘汰什么。这样经由从实践到认识,再由认识到实践如此多次反复,会收到阶段效果。对于这个问题,《生态动力学》一书中所讲的方法论,是适用的。

第二节 大系统生态控制

现代生态问题日益社会化、信息化,而涉及生态方面的人类活动大型化,许多人类活动生态动力源产生正的生态效应或负的生态效应。在控制论中所说的大系统,有许多关系到生态大系统,诸如海洋生物大系统;森林大系统;土地与农耕大系统;河道水文大系统;城市管理社会大系统等。如何管理好上述大系统,包含许多有生态意义的内容。本节在概述大系统生态控制特征和控制结构基础上,举例说明。

一、大系统生态控制主要特征和控制结构

生态大系统的主要特征有:①规模庞大,包括很多子系统和子子系统,如土地农耕大系统含种子生态动力源大系统,营养生态动力源大系统,植物保护生态动力源—汇大系统等。②结构复杂,主要指各元件、部件、子系统之间的联系十分复杂,一般难于用确定型微分方程表达,如品种和病虫害之间,施肥与 N, P, K 元素对土壤、作物和病害影响,农药污染与生态产量等。③功能综合,表现为生态大系统可能有多个目标,其中的某些目标可能是相互矛盾的。例如,水文生态调度大系统,一方面为调节生态动力源,可能以防汛为主,以保护人畜,农林作物不受洪水危害;另一方面以抗旱、兴利为主、保障供水,这样在人为调度时,须充分注意其矛盾性,采用生态控制原理某种方法使调度合理。④

因素众多,主要指生态大系统所处的内外环境十分复杂,受到生态动力源的影响多,干扰多。

下面论述生态大系统的控制结构。总的原则是在集中指导下的分散控制。单一中心集中进行控制的大系统,在大系统控制论形成的初期(先进国家大约在 20 世纪 80 年代,发展中国家大约在 20 世纪 90 年代),由于信息容量有限,有关信息无法及时全面地送入控制中心,造成信息的严重滞后和损失,所以在当时条件下,只能分散控制而不能集中控制。但在近几年,正如我们在第三章所述的作为生态控制信息源渠道畅通,所以通讯技术网络允许大系统生态控制,即可集中控制,又可分散控制,并能很好结合。我国的农业专家系统(熊范伦主持)和农业气象信息系统(太华杰主持)等系统,在现今的通讯条件下,完全可以组建成一个面向大农业的全国性大系统生态控制中心。在大中心集中控制的同时,搞分散控制权力,设置多个控制中心是必要的。因为具体控制,像农事作业,施肥、灌溉等,必须结合当地生态环境实际,只靠全国上下级的指令性控制是不行的。为实现中心和分散结合,从大系统控制论出发,控制结构可分为:①多级控制(multilevel hierarchical control);②多层控制(multilayer control 或 multistratum control);③多段控制(multi-section control)。这里,“多级”在我国可分为:中央、大区(如东北、华北等)、省、市(地)、县、乡六级,“多层”按任务或功能分层,如土肥、水文、植保等,各自生态动力功能不同,起不同的作用;“多段”是指时段,如春播、夏管夏收、秋收秋种等。由于我国有严密的组织体系,有统一规范和管理手段,实现大系统的全面优化控制,是很有条件的。其他方面的生态大系统问题,也可作类似处理。如城市大气质量的控制等等。

二、大系统暨大尺度生态工程的综合控制

为使生态建设有利于可持续发展,从长远的意义上为植物、动物、微生物包括人类本身的生存创造有利的生态动力源并防御有害的生态动力条件,人们总是在想办法即采用必要措施进行综合控制。比较有名的像 20 世纪 50 年代启动的“东北西部防护林工程”,80 年代至今的“三北防护林工程”等,关于这些工程的具体设计,已有相当多的研究,在 2001 年出版的《农田防护林生态工程学》(朱廷曜等,中国林业出版社)是这方面最新的优秀专著。但从生态控制原理,尤其是从大系统控制的原理方面作优化设计,尚不能满足工程建设的需求,所以有必要进行研讨。这样的大尺度的生态建设工程,不同于单项施工的某项工程,主要在于其涉及生态问题极多,不再是一个简单的大系统,而是复杂大系统。因此必须采用综合控制的方法。这样的复杂控制,事实上,能把我们在前面各章所讲的内容,即使全都用上,似显得尚不足,综合起来难度也大。下面我们参照李新春(2001,2002)处理复杂大系统的思路方法,论述其在大尺度生态工程中应用的原理。其中主要是智能控制手段。

1. 用专家系统确定性方案

知识是专家系统核心。为此,所咨询专家,需有生态学尤其是系统生态学、系统工程、应用数学特别是运筹学、人工智能(专家系统、模式识别)、计算机科学、农学、林学,防护林工程学、畜牧、自然地理、水文学、气象学方面的专家。由于具有控制的性质,所以咨询专家中,加强了数学和技术科学方面的专家,这与过去的认识有所不同。专家系统的知识库知识应在征询大量的多学科专家,现场调研和阅读国内外有关资料基础上建立起来。随着知识的增加,随时不断完善。

建立推理机,归纳出可行性方案,方案一般为多种,可以为其可行,但不是最优。将实际情况与专家系统知识库匹配,利用本书前面章节的有关生态控制方法,得出相对优良的可行方案。

2. 神经网络的运用

(1)结构建立

基本目标是评论由专家系统得到的各种可行方案,为此须知道哪些因素在所论生态控制目标中所起作用的大小,即权重大小。在本问题中神经网络输入-输出单元,大概有:贮存条件-总投资、地貌基础-载荷潜力、气候条件-气候生产力、太阳辐射-能值可用量、土壤条件-土壤生产力、生物基础-竞争或共生可能等。

(2)训练学习

将控制手段(培育种苗,飞播造林,雨季人工造林,移植,其他生物的引进,配套工程建设等)作为训练样本进行训练。在网络训练前对作为实际输入样本的输入单元——生态动力源要素,和输出单元进行定性和定量规一化处理,使网络输入单元和输出单元都在 $[0,1]$ 中取值。神经网络训练终止条件为网络实际输出和理想输出之误差平方和满足某一极小值的要求。

(3)决策因素权重确定

对训练成功的神经网络各单元之间的连接权重进行处理,所用公式包括:相关显著性系数,相对影响系数、相关指数、绝对影响系数。

3. 对系统作模糊评判

为了对由专家系统得到的可行性生态控制方案作优化处理,利用模糊数学中的评判系统进行评判。

4. 用遗传算法进行优选

该算法主要步骤有:变量编码;确定计算群体;确定适应度函数;个体复制;个体交换;个体突变;优化停止。所用遗传算法是一种反复进行的工程。群体经过复制、交叉和突变的反复过程,逐渐逼近最优结果。

从上述情况可见大系统暨大尺度生态工程的综合优化,是可以用上述步骤的方法。只要把有关专家的意见搜集起来,利用上述这一包括概率统计、模糊控制及遗传算法的综合控制的智能方法,是可以试运行的。计算是在计算机上用现成软件即可完成的。因此说,这一过程成败的关键,对于生态工作者来说,既不是推导公式,也不是设计计算机程序,而是选好专家,使咨询结果有代表性。这可以同第九章所说的专家系统等结合运用。

三、大系统的最优随机控制应用

这里所说的大系统最优随机控制,包括输入控制。同时,所论随机控制问题的目标函数是状态和控制量二次型的期望值,而线性动态系统则受某些随机项及控制输入的约束。研究表明,如果噪声项是高斯白噪声向量,就可以将控制器从滤波增益中分离出来,如图 11-1 所示。这样,滤波器可以用方程计算,而控制则可用确定方法计算。

系统模型包括控制输入,即

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + \Gamma(k+1, k)\omega(k) + \Psi(k+1, k)u(k) \quad (11-1)$$

$$z(k+1) = H(k+1)x(k+1) + v(k+1) \quad (11-2)$$

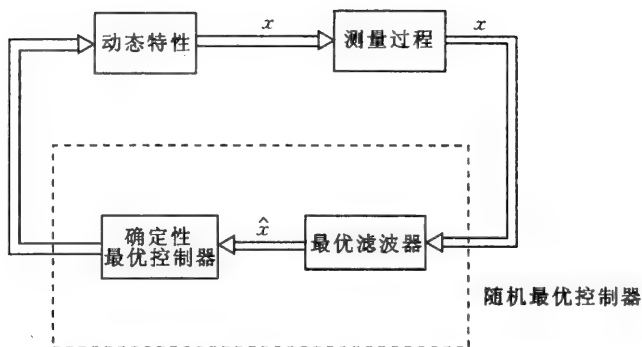


图 11-1 从滤波增益中分离出控制器增益过程

这里 $u(k)$ 是 r 维控制向量, Ψ 是 $n \times r$ 控制转移矩阵, x 和 z 是两个高斯随机向量, 其他符号为状态参数估计的基本符号 (详见 Singh *et al.*, 1983)

控制问题是: 使在式(11-1)和式(11-2)的约束下, 使如下平均目标函数为最小

$$J_N = E \sum_{i=1}^N [\|x(i)\|_{A(i)}^2 + \|u(i-1)\|_{B(i-1)}^2] \quad (11-3)$$

式中, $A(i)$ 和 $B(i-1)$ 分别为 $n \times n$ 和 $r \times r$ 对称正半定矩阵。

式(11-3)目标函数的期望值, 意味着对系统总体性能的评价。选择目标函数的原则是: 只有那些能被控制的状态, 同时也只有那些对状态产生影响的控制, 才能出现在 J_N 之中, 据此, $u(0)$ 是出现在目标函数之中的, 因为它对状态

$$x(1), x(2), \dots, x(N)$$

产生影响, 而

$$x(0)$$

及

$$u(N)$$

都不出现在目标函数之中, 因为前者不受任何控制的影响; 后者是当 $u(N-1)$ 对 $x(N)$ 产生作用之后, 控制问题即告结束。

必须强调指出的是: 所求的解应当是生态控制的可用信息, 不能用未来的生态信息, 也不能用借助某种方法估计出来的生态信息。对于任何给定的 $k=0, 1, \dots, N-1$, 对系统状态可用的 $k=0, 1, \dots, N-1$, 对系统状态可用的信息是观测值序列 $z(1), z(2), \dots, z(k)$ 和初始状态的平均值 $x(0)$ 。这样, 我们所求的生态控制规律, 应有如下形式

$$u(k) = f[z(1), z(2), \dots, z(k), x(0)]$$

这个问题可以有确定性解。下面概述求解的主要过程。

使目标函数

$$J_N = E \left\{ \sum_{i=1}^N [\|x(i)\|_{A(i)}^2 + \|u(i-1)\|_{B(i-1)}^2] \right\} \quad (11-4)$$

为最小, 约束条件为

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + \Psi(k+1, k)u(k) \quad (11-5)$$

这个问题的解符合如下的线性控制规律

$$u(k) = S(k)x(k) \quad (11-6)$$

式中, $r \times n$ 反馈矩阵 $S(k)$ 可由下列的一组递推关系式确定

$$w(k+1) = M(k+1) + A(k+1) \quad (11-7)$$

$$S(k) = -[\Psi^T(k+1, k)W(k+1)\Psi(k+1, k) + B(k)]^{-1}\Psi^T(k+1, k)W(k+1)\Phi(k+1, k) \quad (11-8)$$

$$M(k) = \Phi^T(k+1, k)W(k+1)\Psi(k+1, k)S(k) \quad (11-9)$$

式中,

$$k = N-1, N-2, \dots, 0$$

$$W(N) = A(N)$$

同时, $r \times r$ 矩阵

$$[\Psi^T(k+1, k)W(k+1)\Psi(k+1, k) + B(k)]$$

必须是正定的, $\forall k$ 。

如果要解出原来的随机控制问题, 可以应用动态规划, 得如下的最优控制

$$u(k) = S(k)\hat{x}(k/k) \quad (11-10)$$

式中, $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

式(11-10)中, $S(k)$ 可用方程(11-7)、方程(11-8)和方程(11-9)的算法来确定, 而 $\hat{x}(k/k)$ 可用滤波方程

$$\hat{x}(k/k) = \hat{x}(k/k-1) + k(k)[2(k) - H(k)\hat{x}(k/k-1)] \quad (11-11)$$

计算得出。式中

$$\hat{x}(k/k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{x}(k-1/k-1) + \Psi(k, k-1)u(k-1) \quad (11-12)$$

式中的 $\hat{x}(N/N)$ 是并不要求算出, 因为最后一个控制是在 $k = N-1$ 时起作用的。

另外, $\hat{x}(0/0) = x(0)$ 意味着如果 $x(0)$ 是零均值, 则 $u(0) = S(0)\hat{x}(0/0)$ 是零。

图 11-2 表示该种控制器即应用动态规划的随机控制器的结构。

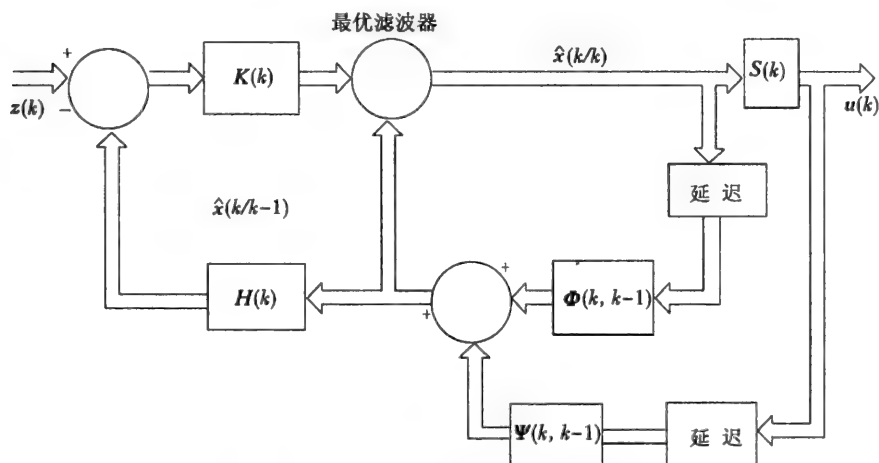


图 11-2 应用动态规划的随机控制器

综上所述, 随机线性调节器的最优控制器是由最优线性滤波器与确定性线性调节器的最优反馈增益矩阵串连而成。滤波增益和控制增益可以分别加以计算。

上述原则即著名的线性随机控制的分离定理, 是经过严格证明(见 Joseph, P. & Tou, J. 1961. On linear control, *Trans. AIEE*, part II 和 Gunckel, T. & Franklin, G. 1963. A general solution for linear sampled data. *Control J. Basis Eng.*)并被控制论专家承认, 直到现在仍然在应用。

下面举出一例,是属于水文和化学生态动力源方面的。涉及河流动态和其中第一段和第二段的生化耗氧量浓度、含氧量浓度,因为氧是化学性质的生态动力源,影响水中生物和用水生物的生物化学过程,所以该例具有生态动力控制意义。

两段河流的动态特征可以用如下两个方程来描述:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{C} + \boldsymbol{\xi}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) &= \mathbf{D}\mathbf{x}(k+1) + \boldsymbol{\eta}(k+1) \end{aligned}$$

式中, $\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}$ 是不相关零均值高斯随机向量, x_1, x_3 分别是该河流的第一河段和第二河段的生化耗氧量(BOD)浓度(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), x_2, x_4 分别为第一河段和第二河段的含氧量(DO)浓度(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。控制作用的表达式为

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} \pi_1(k) \\ \pi_2(k) \end{bmatrix} \quad k=0, 1, \dots, k-1$$

式中, π_1 和 π_2 分别是在第一河段和第二河段中由污水排出的 BOD 最大百分率。

假设在一条河流中, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 和 \mathbf{D} 的矩阵表达式分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0.18 & 0.00 & \cdots & 0.00 & 0.00 \\ -0.25 & 0.27 & \cdots & 0.00 & 0.00 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.55 & 0.00 & \cdots & 0.18 & 0.00 \\ 0.00 & 0.55 & \cdots & -0.25 & 0.27 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 2.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 2.00 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 4.50 \\ 6.15 \\ 2.00 \\ 2.65 \end{bmatrix} \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

因为 BOD 观测比较困难,所以只对 DO 进行观测。

所选择的目标函数为

$$J = E \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{x}(k)\|_{\mathbf{I}_4}^2 + \sum_{k=0}^{k-1} \frac{1}{2} (\|\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}^d\|_{\mathbf{I}_4}^2 + \|\mathbf{u}(k)\|_{100\mathbf{I}_2}^2) \right\}$$

式中,下角标 \mathbf{I}_4 是四阶单位矩阵, \mathbf{I}_2 是二阶单位矩阵,期望值 \mathbf{x}^d 由下列给出

$$\mathbf{x}^d = \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \\ 5 \\ 7 \end{bmatrix}$$

实际上,上述问题可以解释为:在平均情形下,我们要求 BOD 和 DO 分别保持在大约为 $5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平下,而同时使污水处理的工作量最小。

模拟结果:

这一系统在数字计算机上作模拟试验, $k=159$; 控制器的增益矩阵是一个常数矩阵, 即

$$u = Gx + d$$

这里

$$G = \begin{bmatrix} 0.0074 & -0.0011 & 0.0006 & -0.0001 \\ -0.0126 & -0.0015 & 0.0042 & -0.0004 \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0.05449 \\ 0.00668 \end{bmatrix}$$

将这个增益用于滤波递阶结构之中, 对滤波器进行模拟试验。结果表明: x_2 和 x_4 的估计较好, 而 x_1 和 x_3 的估计较差。这里没有观测 BOD 的结果。如果 BOD 的观测值可以得到, 控制效果会更好一些。

有了这种离散随机控制器的模拟试验方法, 可以用于许多其他生态随机控制问题。在目前, 生态控制方面的数据和可以作数量化处理的资料是很多的, 使污水、大气中的污染物处理取得最优控制的结果。例如: 在封闭的舍饲空间内, 使某些气体的含量保持在一定的标准, 而投入的治理费用最小; 在工厂化农业的植物生活环境中, 使某种致病微生物含量达到低限标准, 而投入的药剂(如百菌清)量最小; 使土壤中的无机肥料保持在一定限制水平下, 而对作物生态产量影响最小; 在草原休牧中, 使草场营养保持在一定水平, 而实行轮牧的大范围总体经济损失最小。总之, 对于大系统随机优化问题, 运用离散随机控制器可以使许多已有资料(如土壤普查、大气监测、河水水质)充分发挥作用, 达到大系统优化的目标。

第三节 简单巨系统生存竞争模型

生存竞争是人们熟悉的, 把它归入简单巨系统中, 还是近年的事。当然, 至今简单的巨系统仍是理论模型阶段, 距人们具体实施生态控制实践, 尚有相当距离。但借助作为生态控制基础的理论物理学(如本书第二章指出)的原理加以分析, 为研究生存竞争的生态控制而形成的数学基础的概念和原理, 则是现实的事。

一、生态控制中的简单巨系统

毕思文等(2002)在研究地球系统科学时, 在概率测度熵概念的启发下, 对简单巨系统给出了熵定义。该定义, 原则上也适用于生存竞争暨生态控制问题, 尽管生存竞争属于生物运动范畴。

1. 定义及其主要性质

对于一个由 N 个子系统组成的简单巨系统, 考察系统具有可加性的某性质 \mathcal{F} , 其测得总量为样本空间 X , 每个子系统的测量值即事件为 X_i , 它对总量贡献为概率 $p_i = X_i / X$, 则系统关于性质 \mathcal{F} 的熵值为

$$S = H\mathcal{F} = -\kappa \sum p_i \lg p_i$$

式中, H 为熵函数 $H = H(p_1, \dots, p_i)$, κ 是比例系数, 这里取作 1, S 以 bit(1 个独立的二进制码所负载的信息量被定义为一个信息单位, 称为 bit)为单位, i 取值遍及整个系统。

首先应指出,上述定义是有一定适应范围的。一般来说,熵只能衡量那些满足叠加原理的简单巨系统。在生态控制的一些具体问题中,比如农田生态中各种作物与肥料、土壤、气候及太阳辐射变动等关系,往往具有叠加性,又如森林自然保护区或湿地保护区内部,动植物之间的捕食-食饵系统,均可视为有叠加性质的,这样熵就可以衡量其中的局部与整体的关系。

对于一个简单巨系统来说,可以存在多种性质,对于每一种性质,都可以讨论其熵值,讨论针对某一性质的系统整体与局部之间的关系。

正如 Nobert Wiener 指出的那样,一个系统中的信息量是其组织化程度的量数;一个系统的熵则是该系统无组织化程度的量数。

2. 信息量与熵的变动性:原理及应用

如果状态 i 共有 N 种,当每种状态出现的概率相等时,信息量的关系,经推导可得出

$$H(X) = H_{\max} = \log_2 2 \quad (11-13)$$

即当每种状态出现的概率相等时,信息量取极大值。

这里让我们举出两个例子予以说明。

第一考虑到未来气候变化趋势,在作为简单巨系统的大范围作物种类安排竞争的问题中,有人提出在 21 世纪冬小麦在北半球未来应当北移从而代替在 20 世纪末种植玉米的大片土地;另有人持相反意见,认为应扩大玉米而压缩冬小麦,原因是尽管气候有可能变暖,但严冬季节最低温度不会有大幅度的提高,所以冬小麦北移,难以越冬,因而不易增加总生产产值。

从历史和现状看,两种意见各有理由,作物种类竞争实质上处于相持阶段,可以近似地认为两种意见“势均力敌”,它们各自取胜的概率相等。故 $N=2$,代入式(11-13)我们可以得出:

$$H(X) = H_{\max} = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

这样一来,实际决策者对上述两种意见,均不能采纳,对于冬小麦,玉米的布局,在现阶段是不能盲目调整的,否则会导致简单巨系统生态平衡的破坏,会大大降低生态产量。事实上,如果盲目听信一种意见,即作出“压缩玉米,发展小麦”的决策,那么仅从种子生态动力源这一方面,就会损失很大;因为培育和繁育过多的冬小麦种子,会压种子库底,造成浪费,而不注重玉米种子繁育,会造成供不应求,尤其是在培育,发明玉米新品种过程中,会按宏观决策而中断,一旦中断,则难于恢复,因为育种周期之长,众所周知。当然,如果概率不等,那就是另外一回事了。

如所周知,在信息论中,熵实质上是不确定性的量数,不确定性越大,熵就越大,反之亦然。人们在生态控制(或者说在以往事实上做了生态控制的决策的实践,当时并未提到这个术语,或者说,未从理论上提到该高度)的认识与实践中,经常遇到从不稳定状态向稳定状态过渡的事,正是这种过渡,使得一些客观的生态控制规律,先被少数人发现后,才逐渐为多数人所承认。从发现到承认,尤其为多数人承认,要经历一个过程,甚至是漫长的过程。关于简单生态巨系统,我们可以从东北人主食品种变迁谈起。如将 20 世纪东北人群视为捕食者,其主要食饵是粮食。众所周知,大约在 20 世纪 50 年代后期,东北人的主食仍是高粱米,大田生产的粮食作物以高粱为主。竺可桢院士和张宝堃研究员在 20 世纪 50 年代中期对东北作物种类作过考察。在这以前,大多数人(包括当地农业专家)认为东北发展水稻的主要障碍是温度低,而这是人为无法控制的,所以主要食饵

仍然是高粱米。几千年留在人们(包括专家)头脑中的印象似乎天经地义。当竺可桢等从地理气象与农作物关系加以考察后,令人惊喜的是东北的温度并不阻碍水稻发展。依此提出东北气候适宜发展水稻的建议。这事实上是简单巨系统中生态控制方面的重大发现,一提出时,多数人不理解,不认可的,只有像杨守仁教授等著名水稻专家才予以鼎力支持,并在人民日报发表文章。开始时,大约有 10% 的人承认,有 90% 不承认,这时“不确定性”小,即熵小。过一段时间,随着人们认识提高,达到各 50%,此时“不确定性”大,即熵大。因为两种意见相持,确定性达最大。再经由多次在不同地块试验,人们认识明显提高到一个新高度,比如 90% 承认,10% 不承认,即以 9 对 1 的票数,肯定了这一发现,这时,在新的形势下,“不确定性”小,即熵小了。于是肯定了这一发现。这个熵值从小到大,再从大到小的往复过程,正是人们从不正确认识转为正确认识的过程。今天,我们可以看到,作为东北人主要食饵的不再是高粱米,而是大米了。像这样的例子,在生态方面的简单巨系统中还会举出一些。

3. 用简单巨系统对生态控制系统的描述

一般说来,由于简单巨系统熵是从统计物理中 Boltzmann 熵、信息熵、概率测度熵概念上发展起来的一个基本概念,因此它与上述的熵一样,也可以描述系统的状态,是函数。一个状态对应一个函数值,而不管这个状态是从哪里演化来的。其次,它的熵函数零点也已经被指定,即当系统该性质数值仅由其中一个确定的子系统提供,其余子系统对该性质的贡献为零时,系统对该性质的熵定为零。这与信息熵、Boltzmann 熵、概率测度熵的定义也都是一样的。

生态控制系统巨系统旨在合理调节生态环境,为人类合理利用自然,改造自然,进行优化“掌舵”,使生态环境从低质量向着高质量方向演化,历史上曾经有过大范围改造自然计划,现继续运行的防护林工程计划等,目标也都是通过生态控制,使大面积环境质量增优,向好的方向演化,但也有失误之时,付出努力,效果不佳,甚至走向反面。所以生态控制系统,比起地球系统,更重视研究系统演化,只有对演化规律掌握得好,才不致偏离正确方向。生态控制的简单巨系统的熵,同样可以描述系统以该物理量作为标志的演化方向。生态控制系统认为,系统总要与外界进行物质、能量、信息的交换,因此不着重讨论孤立系统的演化规律。在生态控制的简单巨系统与外界交流过程的演化中,其熵值可预期总是增加的,这说明该系统向着各子系统,向该系统均匀贡献的方向发展;熵值减少,系统则向着某一单个个体对系统该性质主要作贡献的方向演化。可以用熵值的增加或减少来表示系统演化的发展方向——是朝着各子系统均衡,还是朝着子系统差别加大的方向发展。

二、生态竞争的 Lotka-Volterra 模型

Lotka - Volterra 模型是生态工作者熟悉的数学模型,在简单巨系统控制中,有普遍意义,描述了“物竞天择,适者生存”这一基本哲理。现阐述用平均值方法(Puccia, C. J. *et al.*, 1985)阐述不同形式的捕食者 - 食饵模型,找出变量之间、变量与含时参量之间的关系。

按数学理论,定义变量 X 的平均值为 \bar{X} , 涨落为 $Var(X)$, 两变量 X 和 Y 的关联为 $Cov(X, Y)$ 。

变量 $X(t)$ 在 $t=0$ 到 $t=t$ 期间的平均值(数学期望)记为 $E_t[X]$, 其定义为

$$E_t[X] = \frac{1}{t} \int_0^t X(\tau) d\tau \quad (11-14)$$

当所论的时间无限长,且极限 $\lim_{t \rightarrow \infty} E_t[X]$ 存在时,则此极限被称为对应变量 X 的平均值,记为 $E[X]$ 或 \bar{X} 。

Lotka - Volterra 模型的演化方程是

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = aX - bXY \\ \frac{dY}{dt} = bXY - cY \end{cases} \quad (11-15)$$

将食饵的增长率 aX 改成 $I(t)$,这表示由该系统外界的生态动力因素控制, X 按某已知规律增长;同时认为食饵受生态环境影响,自身存在某一确定的死亡率 C ;捕食者的演化机制不变。这样,演化方程为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = I - (pY - C)X \\ \frac{dY}{dt} = Y(pX - Q) \end{cases} \quad (11-16-1)$$

$$(11-16-2)$$

式中, I 是时间函数, $I = I(t)$ 。

用平均值方法得

$$E\left[\frac{1}{Y} \frac{dY}{dt}\right] = P\bar{X} - Q = 0 \text{ 或 } \bar{X} = \frac{Q}{P} \quad (11-17)$$

同样

$$E\left[\frac{dY}{dt}\right] = 0 = \bar{Y}(P\bar{X} - Q) + PC_{ov}(X, Y) \quad (11-18)$$

两式比较有

$$C_{ov}(X, Y) = 0 \quad (11-19)$$

这表明该模型中,虽然 X 和 Y 分别代表食饵与捕食者,但是两者之间并无关联,即一物种数量的变化并不影响另一物种数量的变化,各自以自身的规律趋近于各自的定态解。由式(11-16-1)还可得出

$$E\left[\frac{dX}{dt}\right] = 0 = \bar{I} - (P\bar{Y} + C)\bar{X} - PC_{ov}(X, Y)$$

将式(11-19)代入上式,则有

$$\frac{\bar{I}}{\bar{X}} = P\bar{Y} + C \quad (11-20)$$

利用式(11-17)可得

$$\bar{Y} = \frac{\bar{I}}{Q} - \frac{C}{P} \quad (11-21)$$

容易看出,此系统 X, Y 变量的平均值与 I 为常数时的定态解一样,在 I 随时间变化时,只需将 $I(t)$ 用其平均值 \bar{I} 代替即可。这与 I 为常数时方程定态解 X^*, Y^* 稳定这一条件有关。

进而,由式(11-16-1)可得

$$\bar{I}\left(\frac{1}{\bar{X}}\right) = P\bar{Y} + C - C_{ov}\left(1, \frac{1}{\bar{X}}\right) \quad (11-22)$$

依据函数性质分析[在某一闭区间内,当函数为单调增函数,且 $f'(x) < 0, f''(x) < 0$ 时,则有 $\bar{f}(x) > f(\bar{x})$],可得

$$\left(\frac{1}{\bar{X}}\right) > \left(\frac{1}{\bar{X}}\right)$$

将式(11-22)同式(11-21)作比较,可知,仅在 $C_{ov}\left(1, \frac{1}{X}\right) < 0$, 上式才能成立,即食饵数量 X 与其增长率 I 呈正相关(因为 I 与 $1/X$ 应是负相关的)。

下面考虑 I 与 Y 之间的关系,用 $(PX - Q)$ 乘式(11-16-2)可得

$$(PX - Q)\frac{dY}{dt} = Y(PX - Q)^2$$

考察上式右端, Y 取非负值, $(PX - Q)^2$ 不可能有负值,故取平均值为正。于是,

$$E\left[(PX - Q)\frac{dY}{dt}\right] = PE\left[X\frac{dY}{dt}\right] - QE\left[\frac{dY}{dt}\right] > 0 \quad (11-23)$$

利用变量导数平均值为零这一条件,有

$$\left[X\frac{dY}{dt}\right] > 0 \quad (11-24)$$

再考虑到 XY 积函数演化的有界性,则有

$$\left[X\frac{dX}{dt}\right] < 0 \quad (11-25)$$

将式(11-16-1)乘 Y 后取平均值,并利用式(11-25),有

$$C_{ov}(Y, I) - PC_{ov}(Y, XY) - CC_{ov}(X, Y) < 0 \quad (11-26)$$

式(11-16-2)乘 Y 后取平均值,则有

$$PC_{ov}(Y, XY) - QC_{ov}(Y) = 0$$

将上式提出的关系及式(11-19)代入式(11-26)可得

$$C_{ov}(Y, I) - C_{ov}(Y) < 0 \quad (11-27)$$

此关系表明,存在两种情况

$$0 < C_{ov}(Y, I) < QC_{ov}(Y) \quad (11-28)$$

即得结论:外界控制食饵增长的速率函数 I 与捕食者 Y 之间,如果不是负关联,其关联程度不能大于捕食者的涨落量与 Q 的乘积。

上述结果为人为控制简单巨系统的实践,指出原则性的依据。事实上,可用于许多实际的生态控制场合相应领域。

三、捕食者-食饵永续生存的非线性控制

以往生态动力系统的控制,大都采用非线性,这必然会导致人工生态动力和物质资源的损失,而 Emelyanov 等(1998)的不确定非线性动态系统的控制原理被赵立纯等(2002)用于捕食者-食饵问题,这为其控制更加客观,为简单巨系统的研究,提供了新的方法和依据。

首先:在 Lotka - Volterra 方程的基础上,得出如下系统:

$$\dot{N}_1 = N_1(\epsilon_1 - \gamma_{11}N_1 - \gamma_{12}N_2) + u_{11}$$

$$\dot{N}_2 = N_2(-\epsilon_2 + \gamma_{21}N_1) + u_{12}$$

$$\left. \begin{aligned} N_1(t_0) &= N_{10} > 0 \\ N_2(t_0) &= N_{20} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (11-29)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_1 &= N_1(\epsilon_1 - \gamma_{11}N_1 - \gamma_{12}N_2) - u_{21} \\ \dot{N}_2 &= N_2(-\epsilon_2 + \gamma_{12}N_1) - u_{22} \\ N_1(t_0) &= N_{10} > 0 \\ N_2(t_0) &= N_{20} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (11-30)$$

式中, N_1 和 N_2 分别是食饵和捕食者的数目; $\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma_{11}, \gamma_{12}$ 和 γ_{21} 都是正值常数; $u_{ij} > 0$ ($i, j = 1, 2$) 是控制变量。

由系统(11-29)和系统(11-30), 赵立纯等给出如下结果:

① R_+^2 是系统(11-29)和系统(11-30)的不变集。

②在系统(11-30)中, 对于任意小的数 $\sigma > 0$ 和 Ω 来说, 存在如下控制

$$\begin{aligned} u_{11} &= k_1(N_1^2 + N_1N_2) \max \left\{ 0, \min \left[1, \frac{\sigma - (N_1 - M_1)}{2\sigma} \right] \right\} \\ u_{22} &= k_2N_2 \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{\left[N_2 - \left(M_2 - \frac{\gamma_{11}N_1}{\gamma_{12}} \right) \right]}{2\sigma} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (11-31)$$

于是, 伴有初始条件 $(t_0, N_0) \in R_{+0} \times \text{Int}R_k^2$ 的闭环系统(11-29)的每一个解, 通过调节 k_1 和 k_2 (这里 $k_1 > \max\{\gamma_{11}, \gamma_{12}\}$, $k_1 > \gamma_{21}$), 都能进入域 Ω_δ 。

③如果①的条件成立, 那么系统(11-29)就是永续存在的。

④在系统(11-30)中对于预先指定的任意值 $\delta > 0$ 和相应域 Ω_δ 来说, 都存在如下控制:

$$\begin{aligned} u_{21} &= h_1N_1 \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{\delta + N_1 - T_1}{2\delta} \right\} \right\} \\ u_{22} &= h_2N_2N_1 \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{\delta + N_2 - \left(T_2 - \frac{\gamma_{11}N_1}{\gamma_{12}} \right)}{2\delta} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (11-32)$$

于是, 系统(11-30)的每一个解, 都能够进入域 Ω_δ , 并经由调节 h_1 和 h_2 (这里 $h_1 > \epsilon_1$, $h_2 > \gamma_{21}$) 而维持于该域中。

⑤如果③的条件成立, 那么, 系统(11-30)就是永续存在的。

这种控制的特征可概括为: 它可以使闭环系统成为永续存在的系统; 因为 u_{ij} 在系统无需受控时, 在某些区域有可能为零, 所以它能减少资源和人力的浪费; 这种控制是连续的, 它对所论系统是不能造成扰动的。

其实, 关于 Volterra 方程的一些表现形式的求解问题, 数学家早有研究和讨论。早在 1978 年, 华罗庚院士和王元院士在其专著《数论在近似分析中的应用》中就从数论的原理上作了论证。一系列关于 Volterra 方程的研究, 对于生态系统中只涉及生物和生物关系的 Lotka—Volterra 模型, 都有一定贡献。在现今, 随着生态动力学向着模式化, 应用数学化方向的迈进, 生态控制模型应用, 将是很紧迫的事。在此简单巨系统及其大量的子系统(如林区、湿地、海洋渔场、草原等)的控制中不断探索, 会使综合集成中定量的机理模型方法所占比重加大, 这无疑是定量与定性结合并由定性向定量发展的一个有益的

方面。

四、闭环生态巨系统及其控制

闭环生态巨系统是生态巨系统的一种形式,对它的规律加以研究,将有助于生态经济发展的优化控制。

1. 基本概念

晏磊(1998)在研究资源环境生态系统时,指出开环使用的弊端:资源环境生态巨系统本来具有闭环的体系结构,但限于人类的认识水平,曾将其视为一个可以不考虑后果,只注重索取的开环结构。因为正如我们前面所述,开放性是永续存在的,不考虑封闭(相对闭环)问题,就会使系统输出没有目标控制,如此经过实际反馈到输入端时,都具有正反馈(恶性循环)的反馈信息,刺激人类开环使用输入资源,从而引发一系列问题。据此,晏磊认为:“恢复良性循环的闭环结构,是可持续发展的重要任务”。

基于上述理由,晏磊经研究给出闭环系统图 11-3。

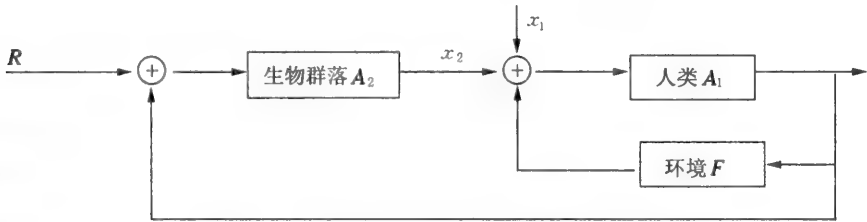


图 11-3 资源环境生态闭环巨系统示意图

2. 对闭环巨系统的初步认识

从生态动力源的属性出发,对闭合生态系统可以从资源性质、环境性质加以分析。从资源性质来说,生态系统中除人工生态动力源外,都具有可持续利用特性,像作为一般生态动力源的太阳辐射对生态巨系统的启动作用,是永恒存在的。在技术不发达的古代,利用得不充分,在现代的应用也是逐步提高的,比如对于霜期应用,在 20 世纪上半叶只是用于玻璃房栽培花卉及价值比较高的蔬菜等,而后来由于塑料膜广泛用于温室,大棚,使其资源作用大大发挥。把生态控制与整个生物系统密切结合,会形成有机的闭环统一体。从生态动力源的环境作用来说,在有生物存在的相对闭环系统中,生物的生存均“享受”该巨系统内部特有的气候、地貌、水文、土壤等必要的环境条件,环境条件为生活于闭环巨系统中的生物提供保障作用。从环境角度认识,必须明确作为生态动力汇的生物所需求的环境指标,随着科学发展,这些指标被定量化,有些已为公众所知。比如人居封闭微环境中的温度、湿度。植物生存环境的 pH,从大范围讲,某些生物之所以生活在地球陆地或海洋的某一区域,也是生态巨系统中的宏观环境的适应。比如,甘蔗、香蕉、橡胶树生存于热带,企鹅、北极熊生存于寒带,在自然条件下,离不开生态环境的闭环范围,人为调节或者说人工为之创造某种环境是另一回事了。

闭环巨系统的生态控制,实质上是人工生态动力源调节资源、环境属性,根据生态动力汇的需求进行必要与可能控制。物种及品种的迁移,是早就存在的闭环巨系统的控制。比如,许多农作物,在许多年前,都是生存于很有限的环境之中,这样的系统是远小于起码是小于巨系统的生态系统,比如说,马铃薯原产于南美洲,这个原产地相对于该作

物来说,也构成一个相对闭环的生态系统,但这个系统,只就地理范围来说太小了,只是一个闭环简单系统。随着人们生态控制实践广泛和理论认识的加深,发现只就这单一的作物来说,这个闭环的地理范围不断加大,成为一个大系统乃至巨系统,至今世界上许多地方种植;即闭环的范围很大了,再说它的复杂性,因为马铃薯的生态问题是相当多的,比如,退化问题,晚疫病问题,就有遗传、生态、植保、病理等多方面专家研究,所以这成了一个复杂的系统,为优化控制,尚须进一步综合研究。

3. 简单闭环巨系统及其子系统的生态控制

这里简述简单巨系统,对于复杂巨系统将在下节论述。对于简单闭环巨系统,可从两个方面加以研究,一方面是主要考虑某一生物条件,而对地域范围不作限制,强调专业性;另一方面,专注研究一个地域,注重其中的几个主要方面的问题。前一种情形,以生态动力汇某种生物为对象,近于专业的生态控制,如以森林为对象的森林生态系统,闭环的植物主要是森林,地理范围很大,甚至可以为全球陆地。又如海洋、湿地、鸟类、昆虫等各自的生态系统等。后一种情形,是以地域为研究对象,如某一个地理范围,而对其中各种生态动力源、汇综合考虑。

闭环巨系统的控制一般是通过其子系统实现的,用系统工程方法模拟。例如,以草原牧场为例,将一个牧场分为三个分室即绿色植物、肉食动物和居民。分别用 $x_1(t)$, $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 表示其相应的态(即每个分室的能量)。再对每个分室分别进行生态学研究,查明其输入项、输出项及其所处的态。用 x 表示态,用 u 表示输入,用 y 表示输出,用 m 表示环境,用 u_i 表示能量从 i 流向 k 。将各分室能流图综合起来,可以列出关于状态的局部过渡方程

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = u_1(t) + u_2(t) + \cdots + u_n(k) - y(k) \quad (i=1,2,3)$$

这样,可以导出该系统的数学模型,这是确定性的模型。当然,不是绝对确定的。对该模型尚须作系统仿真,找出优化方案,作出生态控制的决策。并在决策后进行系统设计,这正是生态建设优化控制,并且是针对简单巨系统子系统进行的。至于复杂系统,则不能像上述那样通过分解来寻找模型。这将在下节研讨。

第四节 开放的生态复杂巨系统及其控制

在这一节,我们首先论述受控对象——生态复杂巨系统,再论述控制该系统的方法——大成智慧工程(meta-synthetic engineering)在其中的应用。

一、生态控制系统是个复杂巨系统

1. 关于复杂性概念

系统论的首创人 Bertalanffy 在 1947 年第一次使用“一般系统论”这一术语,他在《一般系统论》一书中指出:“当我们讲到系统,我们指的整体或统一体”。并预见:系统科学在本质上是研究复杂性的科学。但在那时,对复杂性的研究并无实质性的进展,这种状况并一直持续 20 多年,所研究的仍是简单系统。复杂性的研究,大约自 20 世纪 70 年代开始,其间,Prigogine 等许多国际知名学者研究了探索复杂性等问题,但直到 1997 年提出的有效复杂性概念仍属于西方学术界用量化、形式化方式刻画复杂性的传统方法,

以致其应用范围较狭窄。尤其像许多生态控制问题,最难于应用之。人们也几乎没有能给出关于复杂性的公认定义。

钱学森、于景元、戴汝为(1990)通过对系统科学及其应用的探索和研究,特别是在建立系统学的过程中,逐步认识到复杂性研究的重要理论和实践意义。钱学森明确指出:所谓“复杂性”,实际是开放的复杂巨系统的动力学。这样,从一开始钱学森就把复杂性研究明确纳入系统科学范围,这是钱学森认识有别于国外学者的一大特点。

在生态领域中,运用复杂性实际是一种动力学的概念,可将许多现实的含微观、宏观的许多生态控制问题建立在生态动力学尤其是源汇关系之基础上,则是面对复杂性而加以控制好的必由之路,是在认识生态环境基础上为改善乃至改造生态环境,使其有益于人类生存,有利于可持续发展的永恒课题。总之,生态控制的复杂性乃是在生物与环境关系的生态动力学基础上,探索优化调节、适应、控制生态环境之规律的系统复杂性。

2. 关于“把复杂性当作复杂性处理”的生态问题

许多学者对将复杂性作简化处理的研究方法、路线存在的问题提出批评。指出:过去 400 年中发展起来的简化理论和方法,不适用于正在兴起的复杂性科学的需要。当然许多人为的简化,把许多生态动力学问题简单地处理为一般的理论力学问题是不合适的。由此引出的生态控制的失误,大大小小的例子,不胜枚举。遗憾的是,至今尚有许多人未从“把生态控制复杂性作为简单性处理”这一根本原因来认识失误的本质。

(1)把非线性当作非线性处理

在生态控制中,面临的非线性问题是非常多的。但为了使所面临的复杂的非线性问题能够用数学方法来处理,作了线性假设。比如常用线性回归方程处理生态动力汇(作为因变量)对生态动力源因子(作为自变量)的依赖关系,再依所得结果,指导控制实践。这样的把非线性问题线性化,在一定条件下是可以近似运用的,但从复杂性概念实质来说,是有其较多缺点的。比如生态工作者熟悉的积温概念,是把温度观测离散值相加,近似表示一个地区的热量,比如生育期有 $3500^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,某植物需要的积温指标达到 $3500^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,可认为可在那里生存,即热量这个生态动力源可满足。其实,这也是用线性来近似非线性的一种做法。因为上述积温值也只是个大概的平均概念。不同时期温度高低不同,并非线性变化。农作物的春种秋收,草木的一年一度的枯荣,都与生态动力源因子的非线性关系密切,关于生物非线性原始思想,我国早已有之。我国古籍《庄子·天道》篇里说:“天道运而无所积,故万物成。”《庚桑楚》中说:“夫春气发而百草生,正得秋而万物成。夫春与秋,岂无得而然哉?天道已行也。”植物从春到秋的变化规律,要经历不同的自然生态条件和人工生态控制。在这当中,变化最大的属天气,比如一年中可能有天气振动,大风、暴雨、干旱、冰雹等突变现象,如果只用多年平均的温度来衡量,势必把模糊突变、混沌等非清晰生态规律(如本书第七章所述)平衡掉了。在复杂性的许多子系统乃至子子系统中,由于将复杂非线性问题简单化,与实际过程不符。比如,天然流域暴雨洪水的产汇流过程是非线性的,特别在中小流域或都市区域暴雨洪水转换的非线性尤其明显。20 世纪 70 年代中国暴雨洪水计算中广泛应用纳希(Nash)单位线模型,然而,该模型是概念性的比较典型和有代表性的线性水库模型。20 世纪 90 年代后,国际国内还进一步发展了地貌单位线模型的系统分析方法。由于单位线的水文线性系统假设,在实际应用中发现许多与水文观测不符的问题,后来经过许多学者研究将雨强与其参数建立联系,可达到非线性改正的目的,发展了单位线模型(准线性系统)的方法(夏军,2002)。

(2)把远离平衡态当作远离平衡态处理

各门经典科学(比如物理学)视平衡态为系统的唯一正常状态,把非平衡态理解为干扰因素造成的非正常状态,力求将平衡态下获得的结论线性地推广于非平衡态。这样的处理远离平衡态的生态控制问题,也是错误地处理复杂性问题的做法。在农田生态这样的复杂性的生态控制问题中,面临的许多决策的正确与否关系到生态产量的高低。比如说,科学掌握农事季节的问题,我国古代的“三才论”就有“天时”的说法,并且有像“清明忙种麦,谷雨种大田”这样的谚语,但如果不加分析地对待它,势必造成失误。事实上,上述农谚的意义是指平衡条件下的产物,在其形成以致持续使用的两千年左右的时间,只是在一般的适宜播种这样的生态动力条件下成功。因为“清明”二字已把时间指示得很清楚,系在4月5日或其前后的日子,此节气乃是太阳与地球关系的必然结果,是处于平衡不变的天文条件,但如果把它用于研究地球上在某一个位置的气象条件就不完全合适了,只是气候条件可以说各年在同一纬度相差不多,从气候上看,应当说也是平衡态。但是,在播种的当年总不是考虑气候条件,而是考虑天气条件,而天气条件则完全可能远离处于平衡态的气候条件。论及播期决策,就离不开具体生物,这就必须考虑生态控制问题。首先要考虑生物对环境条件的要求,再考虑环境的变化。种子发芽要求的温度,不是一成不变的,因品种不同而异。即使天气不变,由于作物生物特性是远离平衡态,所以在20世纪60年代以来,东北南部春小麦播期比清明要早得多,于是“清明种麦”已不适用了,如果把这个远离平衡态的事实忽略,按平衡态处理,势必使生态措施远离实际。而对大田作物,则在谷雨前后,大概是适宜的,是近平衡的,但各年的天气生态动力因子及其所促成的温度、雨量等,也常会远离气候这一平衡状态。如果有的年份天气未远离气候则当然按非远离平均态处理。正如 Prigogine 所说,系统在平衡态及其附近只能表现出平庸行为,在离开平衡态足够远时才能表现出非平庸的复杂行为。这对于生态控制也是适用的。就以农田生态来说,“风调雨顺”是平衡态,生态控制的作为显得平庸,而远离平衡的非风调雨顺的,甚至五灾(旱、涝、冰雹、霜等)俱全的年份,总会出现的,在此种年份,生态控制的作为就非平庸了,在这样的年份,生态控制者应利用已有多方面的成果,不断耗散作为不正确认识的旧质,而补充以正确认识的新质,才能驾驭这样的非平庸及远离平衡态的生态问题,适应自然,战胜自然。

(3)把混沌当作混沌处理

在处理生态动力源和生态动力汇的许多复杂问题中,过去多年有不少把混沌视为噪声,这实质上是把混沌当作清晰来处理。我们在《生态动力学》一书中曾介绍过作为气象学家的 Lorenz 在研究气象问题中发现的混沌(1963年发表在美国《大气科学学报》上)对于生态学有许多应用。这并不限于气象类生态动力源本身的混沌上,在多种生态动力源自身,尤其是它们同作为生态动力汇的生物作用,混沌性是更为明显的。可是在没有考虑到复杂性的客观存在时,把“混沌”处理为“非混沌”的事实是不少的。如在1979年以前,由于植树造林,开发草场,农事作业,水产捕捞等活动的需要,未来5d的中期天气预报(含温度、降水、风等生态因子预报)人们是急需的。事实上在实施生态控制的实际生产管理,有一部分抱着坚信科学的信息,按5d预报结果安排生产,结果却多次失误。其本质原因是在这些管理者的认识上,缺乏混沌的概念,用本来依据不充分的5d预报于生态控制之中,乃是把本来混沌占优势的结果当成非混沌占优势的结果,即没有能把混沌当作混沌处理,必然出现失误。从这个极端走向另一个极端的行动,乃是在管理者“吃

一壑”之后,误将 1979 年已过关的 5d 预报(意指准确率相对较高,也并非不存在混沌)按以前的“吃一壑”对待,不予应用,这则是把相对非混沌视为混沌,而是未能“把混沌当作混沌处理”的另一方面的失误。又如年景预报对生态控制的作用是任人皆知的。但在年景预报远处于混沌状态,竟有生态研究者盲目相信,比如前些年有人提出一种所谓依年景预报,优化利用作物品种的决策思路,即为了以“治本”措施防御冷害(cool summer damage),依据春播前作出的年景预报办事。如果预报当年的温热状况为“冷害年”,则种植生育期短的品种;否则种植生育期长的品种。这实质上,是把至今仍处于混沌状态的年景预报误作为非混沌处理,导致起初某些年份失误之后,不了了之。有人 20 多年前提出的这种“成果”,至今档案完好地保存着,而事实证实这类“成果”除造成生态控制某些失误之外,就是给人以教训;如果不注意“把混沌作为混沌处理”这一复杂性,即违背复杂性这一客观规律,把复杂的生态控制问题处理为简单问题,是不行的。亲历或经调研分析多项案例而取得经验者,总是“吃一壑长一智”的,以致令自觉不自觉地体验到“把混沌作为混沌处理”的内涵。比如一位在国外师从名家读研究生时,专门学长期预报,后来成为研究长期预报近 50a 的著名气象学家深知长期预报的混沌性,所以他坚决不提倡依年景预报指导农业的作法。这在现阶段,估计在长期预报过关之前,他的这种看法是正确的。这几年来,一些生态工作者研究较多的课题之一是未来气候变暖对生物的影响问题。因为这是关系到气候生态动力源对生物这个汇的长远作用,是关系到地域大气圈对生物圈影响的百年大计,这样的研究是很必要的,及时的。其中一个重要方法论问题,也是必须把混沌当做混沌来处理。否则,又会重蹈“按年景预报安排作物”那样的生态措施的覆辙。尤其不可离开生态控制复杂性的特征而盲目实施。未来 100a 地球大陆温度比现在是高是低的预报,研究是必要的,但绝不能把处于混沌认识阶段的现实认为是非混沌的结论。前不久,有生态研究者根据气象专家认为百年气温升高的预报,提出森林、草场、农田乃至作物种类变化的安排意见。这事实上是把“赌注”压在气候变迁预报准确的基础上,至于这样的“准确”的混沌实质,则并未被这些生态研究者重视。一般说来,生态学家对气象学应有较正确的理解,而限于利用气象数据和预报结论。试想,即使是一年的长期天气预报(也有称为短时气候预报的),尚未过关,当今有哪一位气象学家能作出百年以后的预报,而且是关于温度具体度数的准确预报呢?研究归研究,未成功时,即处于混沌状态时,必须按混沌态认识,而不该用其结论指导其余学科。这就好比说,药学家在研究一种新药,但在没有成功时,不能轻易用于临床。所以,把复杂性中的混沌当作混沌处理,是复杂性生态控制的一个重要方面。

关于复杂性问题的处理,除以上几类外,还有分形,模糊性等,在生态控制的理论研究与实际应用中,都是必须注意的。上述特征在简单巨系统中也可能出现,但那是高层次的复杂性。对于高层次的生态控制复杂性的科学理解用复杂性处理复杂性,是生态控制者必须遵循的方法论准则。在定量研究中,尤其注意不可以简单的数学模型强制处理复杂问题。当然,并不是不用,而是在合理条件下应用。

二、生态控制的开放复杂巨系统:特征认识

如我们在本章第一节所述,系统与环境的关系决定生态控制的特征。生态系统所处环境,环境超系统是否复杂,系统开放的方式和程度,都直接影响或规定着系统的复杂性。生态控制的复杂巨系统难于用控制参数的变化来描述。根据钱学森在谈到巨系统

的论述:“这不只是大系统,而是‘巨系统’,是包括整个社会的系统。”对照一下,我们所论述的生态控制系统,恰是涉及整个社会的,而不单纯是生物与环境关系的描述。因为生态经济控制,从宏观、微观来说,并未离开经济学,即包括经济学这门重要的社会科学分支在内的社会研究领域,而且凡论及控制,无不是人工生态动力源在起作用,而人总是存在于社会的,所以生态控制系统是整个社会系统的一个组成部分。

生态控制的巨系统在地球上广泛存在的。在生态巨系统中,往往种类繁多,并有层次结构,它们之间的关联方式又很复杂(如非线性、随机性含马尔可夫性,非清晰性含模糊性、动态性等),这就是复杂的生态巨系统。这类系统无论在结构、功能、行为和演化方面都非常复杂,在时间、空间和功能上都存在层次结构。而生态巨系统的控制(不限于 control,而包括在 cybernetics 以及其他原理指导下的控制),终归要经由人脑系统才能完成。而人脑系统本身,由于记忆、推理和思维功能以及意识作用,其输入-输出反应特性极其复杂。对于生态的控制,人脑,或者是不自觉地或者是自觉地曾经利用并正在利用过去的信息(记忆)和未知的信息(推理),以及当时输入信息和环境作用,作出各种复杂反应。下面举一个人类活动对环境影响的例子。

随着农业发展,化肥、农药施用量在增加,由于化肥、农药过量和不合理使用,污染了水体、土壤和大气,造成土壤退化,降低了农产品质量,使有毒物质沿着食物链进入人体,也可通过饮用水直接危害人体,威胁人类健康与生存,阻碍可持续发展。这是一个复杂的生态巨系统,它包括土壤-农作物-大气子系统、人体公共卫生系统,还有禽畜卫生系统等。若细分,还可分为水循环子系统、氮循环子系统、重金属循环子系统等。

几年前对苏州农业污染进行了一次调查,结果发现农业自身污染对农业环境质量下降的贡献值,在某些指标上已超过工业污染。在太湖地区水体总氮、总磷的污染负荷中,来自农业污染分别达 56.50% 和 14.31%,比工业污染分别高出 42.37 和 5.57 个百分点,认为农业污染是苏州市社会经济发展的重要制约因素(刘青松等,2003)。

第一,直接危及生存与发展,苏州市的生态环境承受的强度与压力已经大大超过了自然环境的承载能力。在农业污染作用下,太湖水域的总氮、总磷年均值分别达富营养化浓度的 15.7 倍和 6.65 倍。由于水体富营养化,造成全市农业能供人畜饮用的内河水源几乎丧失殆尽。在长期过量和不合理施肥和水土流失影响下,地力明显减弱,农村耕地缺磷面积占 33.4%,缺钾面积占 10.66%。

第二,危害人群自身健康。化肥过度施用造成土壤中硝态氮积累,随着水土流失进入河湖,人们饮用后,在人体内合适的致碱条件下转化成具有强烈致癌作用的亚硝酸盐类物质。

第三,严重影响农业发展。近 20 年来,我国化肥的亩施用量超出世界平均施用量 1 倍多,其利用率只有 30%~40%,其余都进入环境。1994 年我国农药产量占世界总产量的 10% 左右,现阶段我国每年有 25 万 t 以上的化学农药暴露于环境,其中 80%~90% 农药散落于土壤和水中,污染水体和土壤,不但降低农作物质量,还影响农业持续发展。

三. 开放的复杂生态巨系统

我们曾经说过,对于生态系统,开放是绝对的,封闭是相对的。对于复杂巨系统来说,尤其是这样。控制论把开放表述为系统的输入、输出和干扰,自组织理论把开放性表述为控制参量数对系统的影响和涨落的作用。但随着系统研究的深入发展,随着人类对

某些人类活动造成的生态环境破坏的严重后果认识的加深,人们认识到对于系统开放性认识不足,在1991年Hewitt等提出“开放系统科学”的概念,大约在同时,钱学森对“开放的”一词赋予新的内涵。钱学森的意思是:“开放的”不仅意味着系统一般地与外界环境进行物质、信息的交换,接受环境的输入和扰动,向外界环境提供输出,而且还具有主动适应和进化的含义。“开放的”还意味着在分析、设计和使用系统时,要重视系统行为对环境的影响,把系统运行和环境结合起来考虑。“开放的”还意味着系统的动态性和发展变化性。这里“开放的”涵义的提出,事实上基于包括复杂生态巨系统在内的广泛的复杂性系统。因而,该涵义的应用,也应首先在生态控制。事实上,社会对生态控制作用,是客观存在的,只是过去人们没有深刻认识或因生态意识淡薄,未予重视。我国大约自1978年以来,开始重视生态,是生态控制巨系统对外开放,尤其是对社会开放的结果。而在那以前,生态控制的基本原理只是书斋里的设施。除专门研究生态者外,全社会很少有人具备普及性的生态知识。比如我国在1971年以前出版的书中,除生态专著教材[当时也很少,如乐天宇的《植物生态学》(中国林业出版社,1958);马世骏的《昆虫动态与气象》(科学出版社,1963);何景的《植物生态学》(1959);乐天宇的《植物生态型学》(科学出版社,1966)]外,只见竺可桢的《物候学》(科学出版社,1975)和方宗熙的《生物的进化》(科学出版社,1976)中提到生态学。那时,即使是与生态学科关系密切的专业人员,也有不少与生态学“绝缘”。1978年以后的改变,乃致今日的发展,说明生态控制系统的开放性与社会的进步,这与经济发展和政府关心,是分不开的。今日的人们,去参加植树造林,去采取某种行动减少向大气中 CO_2 和 SO_2 排放量,去保护公园绿地和草坪,他们都会意识到,他们的这些生态控制行为,是为生态环境的改善服务,也是对整个乃至全球生态这一复杂巨系统的优化作贡献。我们注意到生态控制开放性,首先是注意复杂巨系统的积极意义,同时也要警戒某些不良后果,尤其是人们无意识酿成却不易觉察的后果。

四、开放复杂生态巨系统的处理方法

在前面我们简述了直至开放复杂生态巨系统的各种生态控制系统,这一部分我们则论述面对它们的处理方法。由于一些处理生态系统、大系统、简单巨系统一般的方法,已结合系统予以论述,所以在此只论开放复杂巨系统处理方法在生态控制中的应用;主要是综合集成、研讨厅和大成智慧工程。

钱学森等(1990)曾经指出:“开放的复杂巨系统还没有形成从微观到宏观的理论,没有从子系统相互作用出发,构筑出来的统计力学理论,那么有没有研究方法呢?”接着指出:“实践已经证明,现在能用的,唯一能有效处理开放的复杂巨系统(包括社会系统)的方法,就是定性定量相结合的综合集成方法。”由于钱学森等在1990年发表的这篇文章中,已提到生态环境系统,“提到用生态系统和环境保护以及区域规划等综合探讨地理科学”等问题,所以更引起本书作者的注意,并开始结合大范围生态建设、国土开发等研究加以试用。比如,在区域生态建设系统工程的研究中,在上世纪70~80年代运用了一系列的数学方法,其思路旨在发挥有志于数学生态研究并有一定数理基础且出身于生态学科(指在大学入学时就学习生态或某一分支者)的研究者的优势,以补偿当时某些生态地理项目中定量研究之不足。一般说来,系统工程方法中的规划论、排队论、库存论、Monte Carlo方法、模式识别、决策论、对策论等,都曾不止一次地应用于生态与规划之中,涉及因素之多,数据之广泛,学科交叉之复杂,是广大生态、农业、地理工作者公认的。但经多

年努力所得结论,用于解决社会上生态-经济开发这样的复杂问题还是力不从心的。比如在各种会议上宣读定量研究结果时,可能与实际相矛盾,在从生态、经济、社会三大效益作系统决策时,所得结果却未能将山区污染物排放量计算进去,以致在大气污染已严重的山谷中,再增加污染物排放量是绝不可取的。否则排放物给生物带来的污染,后果不堪设想。为什么付出这么大的努力,效果却不一定好,甚至会得出与常识相反的结果呢?经过反思,才认识到:这是因为即使像数学(主要是应用数学,像概率统计、微分方程、控制论、运筹学等)这样在20世纪80年代已被许多科学工作者广泛使用的理论和方法,也遇到许多严重的困难,因为在生态经济和生态建设中所面临的许多复杂问题,比地学中问题复杂得多,比天文学某些问题更复杂。人们熟知的在微积分创建的初期,与牛顿、莱布尼兹同时代的天文学家埃德蒙·哈雷利用微分方程于1705年预告“有一颗大彗星将于1758年再次出现”,而1758年约翰·巴里茨克真的观测到这颗彗星。但是在大气科学中试运用数值方法作天气预报,试验始于1922年,初见成功是1950年,进一步成功是1979年,而且至今仍有许多复杂问题难于处理,更谈不到同约300年前的哈雷彗星的数值预报作比较。由此看来,在复杂生态控制中遇到许多数学处理上的难点,是可以理解的。对照一下钱学森院士的开放的复杂巨系统理论不难认识到:因为我们所面临的复杂巨系统特别是其涉及社会经济方面的内容(而生态建设,生态控制不可能脱离这方面的内容),一般尚无法准确地用现有的数学工具正确地描述出来。正如王寿云研究员(1988)所指出的那样:“当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时,容易注重于数学模型的逻辑处理,而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道,这样的数学模型,看来‘理论性’很强,其实未免牵强附会,导致脱离实际。与其如此,反不如从建模一开始就老老实实承认理论不足,而求援经验判断,让定性的方法与定量的方法结合起来,最后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充,是很重要的”。数学模型实质上就是数学在非数学领域的应用。我们从一开始学习生态学,一直追求数学在生态诸多领域的应用,去了解数学在天文学、地学中某些应用的规律,旨在用他山之石来攻本学科应用之玉。我们在运用数学于生态控制中做过的工作,面对某些简单系统,尤其是个体生态问题,可以说是有些把握的,尽管存在某些牵强附会的成分,却尽量用较可靠的假定处理问题,比如用非参数统计处理自然灾害问题(见裴铁璠等,《自然灾害非参数统计方法》一书,科学出版社,1999)。但在处理复杂生态建设与经济问题时,只靠数学模型就不够了。这也是生态巨系统控制必寻求新方法的主要原因所在。

钱学森等提出的综合集成方法论(meta-synthesis methodology)的实质是把专家体系、数据和信息体系以及计算机体系结合起来,构成一个高度智能化的人机结合系统。

综合集成方法论用于开放的复杂生态巨系统的控制,是在全社会生态意识普遍提高,相关科学技术迅速发展的大背景下形成的,是在人们迫切需要发展生态大农业、优化生态环境、提高健康水平和生活质量的客观形势促进下,应运而生的。但是在钱学森等该方法论被阐明之前,未上升到哲理的高度。生态巨系统综合集成问题,是依赖于面向生态问题的如下三个层次知识的:①经验知识,感性知识以及不成立的实践感受。例如,实际生产者在基层工作多年的农林渔牧等方面的人员,他们在生产中实践了人为生态控制,比如我们曾在某县山区叫做吐云寺的小村庄调查中发现:那里果树分布比较稀疏,太阳光可透过果树各树冠的空隙透射到地面,于是当地农民在塑料棚栽培蔬菜这一想法的启迪下,在树下扣小棚栽培蔬菜,结果既充分利用了土地,又对果树培育有利。人们只知

道那里的生态环境“是什么”适合于什么生物,尽管是知其然不知其所以然,然而这些感性知识,对于生态控制研究者是很宝贵的。这些知识一经研究提炼,将会成为有利于生态控制研究的科学知识。②科学知识随着生态及其有关生态动力源、汇试验研究内容的广泛进行和数学模型建立,这样的知识与日俱增。做综合集成研究者,不仅要重视自身的研究成果,也要及时学习他人成果并付诸实践。③哲学知识问题。哲学是知识也是智慧,辩证唯物主义是人类知识的最高概括,是人类智慧的最高结晶,它必须是生态控制综合集成的指导思想和原则。对以往在生态控制中的失误,是客观上脱离自然辩证法的结果。总结以前经验教训,不但要靠自然科学,还要运用哲学。

五、研讨厅体系及其实现

这里介绍研讨厅概要并简论其生态应用的问题,再介绍其实现方法。

1. 概要及生态应用

对开放的复杂巨系统作综合集成,需要有特殊的组织形式,这正是钱学森院士倡导的综合集成(也可作大成智慧工程)研讨厅(Hall for Workshop of Meta-Synthetic Engineering)(下简称研讨厅)的客观背景。1992年,钱学森院士在“从定性到定量综合集成法”的基础上,针对如何完成思维科学的任务——提高人的思维能力——这一问题,进一步提出研讨厅。对于它的含义,戴汝为院士(2002)精辟地概括为,这个“厅”乃是专家与计算机、信息资料情报系统一起工作的“厅”,这是把专家们和知识库信息系统,各种人工智能系统,每秒几十亿次的计算机,像作战指挥厅那样组织起来,成为巨型“人机结合”智能系统。“组织”二字代表了逻辑、理性,而专家们和各种“人工智能专家”系统代表了以实践经验为基础的非逻辑,非理性智能。所以这个“厅”是辩证思维的体现。在生态控制领域,如果让我们回忆一下本书前十章的内容,不难看出实现研讨厅的基本条件是具备的。而且,客观存在于我国广大国土之森林、草原、各种自然保护区、大农业生产单位,涉及生态控制的各种经验知识,正反两个方面的经验与教训,是异常丰富的。近年我国网络用户激增,普及于基础生产、技术单位,为生态研讨厅的建设提供了必要的设施。一旦及时建成开通,对实现开放的生态复杂系统的“作战”工程,打好像“南水北调”、“气候变迁”、“退耕还林”等业已引起社会重视的重大生态“战役”,是尤其必要的,是完全可获得胜利的。

2. 实现的研讨

胡晓惠(2002)在研讨厅研究及系统实现的基础上,论述了研讨厅的作用、特点及解决的问题,并提出了研讨厅系统实现的关键问题,包括如何实现从定性到定量适于研讨厅的研讨过程、研讨模板,面对问题重构的概念和内涵、利用新的计算机技术,构建了一种研讨厅的系统结构及其综合集成系统。在生态控制方面的应用,“厅”的实现也遵从一般规律,即可分为综合集成系统和系统结构两个方面。

(1)综合集成系统

这里首先是网络集成管理。最好由国家或大区域的生态中心全面管理涉及生态问题的单位网站和用户。由于生态问题所涉及的面广,而支持单位,用户又具有极其分散的特点,所以在设计时,总的中心要善于协调各专业生态动力源部门,比如环保、水文、气象、湿地、森林等部门的上网信息,这些经由各行业专家处理加工的信息,具有高质量特征,一般是经过严格审查的。但这些信息不能代替经验性的信息。如农民专家李宝田在

东北搞温室栽培桃树而获得丰收,经验是优化控制温室内生态环境。这一信息,虽一时不能用生态控制原理解释,但可进一步研讨。此时如调用国内外有关这方面的网上发布的新成果,当可使经验上升为理论认识,便于网上广大用户借鉴它发展生态农业,这样类似的信息、数据经相互交叉作网络集成管理、数据集成管理,可实现远程调用,成果共享的目标,不但综合长远意义明显,而且满足用户现实需求之目的。也调动涉及生态广大网民利用网络并为之作贡献积极性,有利于综合集成的发展。而在定量为主的方面,现在在国际上,几乎每天都有一定的定量生态研究成果,通过调用 Internet 资料可及时浏览应用。

(2) 系统结构

对于像宏观生态经济控制方案这样的开放复杂巨系统问题,需要把包括本书前十章所述的各个方面各种分析方法(用控制理论的,确定的,随机的,非清晰的,人工智能生态控制的等)、工具、模型、信息(如第三章所述各类)、经验和知识进行综合集成,构造出适用于生态控制问题的决策支持系统,以利解决复杂的生态控制问题。

为完成一系列工作,必要的硬件、软件设施是保障条件。系统运行至少需要由三台服务器组成的浏览器/服务器结构。综合集成系统中的分布式网络环境是系统依托的硬件、软件环境,是其他几部分研究内容的物质基础,模型库管理系统,数据库管理系统将对分布在分布式网络环境上的系统中最基础的两大资源(模型,数据)进行有效的管理,为最终用户或系统其他模块提供高效的、方便的调用手段。

研讨系统面向由生态专家以及涉及生态动力源方面的非生态专家组成的专家群组,它可完成的工作包括:专家知识同系统的有机结合,专家之间(尤其是不同知识结构专家之间)的协同,为难于控制的复杂生态问题的解决提供综合手段。研讨成果中试用户和生产实际用户,通过面向问题的模板来分析问题。在此过程中,通过综合处理系统利用模型数据方法等来分析和研究生态控制问题。

六、生态大成智慧工程

钱学森院士对系统科学和思维科学所做的大量开创性工作,以及关于系统科学和思维科学交叉发展与整合所做出的贡献,形成了大成智慧工程(metasynthetic engineering)。大成智慧工程作为一种综合性系统性的方法,终将被许多部门应用,而将它用于解决生态控制问题,必将形成一套可应用于生态控制各分支领域的方法——生态控制的大成智慧工程(ecological cybernetics metasynthetic engineering 或 eco-cybernetic metasynthetic engineering,简记 ECME)。而这是本节所论述的一切方法问题的最终概括。

1. ECME 形成的必须性和必要性

自从 20 世纪 20 年代,生态数学模型的提出和近 80 年的发展,使其吸收了大量基础学科和应用技术的优秀成果。国外形成的模式已很多。自 20 世纪 80 年代至今,生态研究项目及其成果也不少。成果的学术价值和应用意义,在生态建设、生产、环保等方面发挥了作用。但必须看到,这些成果大多是分散的,针对某一或某些具体问题,相互缺乏交流,虽然集中了各个研究群体的智慧,但没有综合起来形成一个有机整体。从硬、软件及通讯设备上,我们在 20 多年前,是很落后的,即使有集腋成裘的想法,由于分散于广阔农村、山区的用户无通讯机器设备,也不可能综合起来。随着社会的发展,近十年尤其近三年来,情况发生了变化。用户既有在网上联系农产品的能力,也具备一定网上生态控制

条件,急需技术的接收和应用,这是发展的动力,因而必须要求由中心向用户传播的功能。在这方面,大约是在 60 年前,气象学的全球网络的建立,做出了榜样,为集中全球资料作各地预报,而形成了专业通信、填图、预报的一套方案,对此 Patterssen 等人总结出来的天气学(synoptic meteorology),实质上是一种针对预报的专业大成智慧工程。其中 synoptic 一词的词根本义与 synthetic 是一致的。生态控制中心的建立会起到一个相当于气象部门的气象台的作用,这样的中心,实际上应是生态控制工程中心(engineering centre)而不仅是研究中心(research centre)了。

2. 实现 ECME 的方法论

ECME 的实现是一个复杂艰巨的任务。在现阶段,由于已经有了基础的大成智慧工程方法的指导,所以生态工作者应自觉地在其指导下,开展生态控制理论方面的研究与应用。从科学发展的历史上看,方法论的创新,将孕育着伟大的科学革命,最典型的例子是培根创立的还原方法推动了 19 世纪到 20 世纪科学的大发展。而钱学森创立的大成智慧工程(含综合集成、研讨厅)具有控制论的新的里程碑的意义。于景元(2002)评论道:“钱学森深谙西方科学哲学的精髓,又吸取中华民族古代哲学的营养,使他能够把还原论与整体论结合起来,并运用辩证唯物主义,创立了综合集成方法论,它必将推动 21 世纪系统科学的大发展。”作为生态研究者须自觉地把这一方法论及其进展,科学地、及时地用于生态控制原理之中。由于这一方法初创于我国,这为我们跟踪其动态,提供了得天独厚的优先条件。据可靠的消息,我国于 1999 年 6 月,钱学森的学生戴汝为院士等开始实施一项方法论体系研究,致力于把“研讨厅”建立在 Internet 的基础上,使研讨不受时间和空间的限制,使“研讨厅”实际上成为一个“赛博空间”(syberspace)。这样的研讨是利用现代科技体系思想,综合古今中外上万亿个人类头脑的智慧!在生态控制方面,上述特征尤其突出,由于摆脱时空限制,对全球生态巨系统控制措施的研究更为有利。在生态方面,直接运用的除古今中外具有普遍意义的思想和哲学家外,涉及专业的,我们须综合像范胜之、贾思勰、徐光启等农业大家,李冰、郾道元等水利大家,沈括等地学大家等中国古代学者及许多现代的中国外国有关学者头脑中的智慧,必将使生态方面优先利用钱学森等方法论的指导,取得相应阶段成果,如能及时反馈给钱学森学生们 1999 年开始的课题项目,也许能对综合方法论起到一些辅助作用。由于生态控制的实践性和交叉学科特点,所以应对诸如本书所述的方法、原理,以及更广泛的问题,逐步付诸应用。但由于认识会往复,学科在发展,所以既要注重新的信息资料,又要不断安排必要的试验。

在人与机器关系方面,注重以人为本,让机器为人服务。在这里不是说机器设备不重要,而正是发挥了人用机器的能量,才使机器更好地服务于人,服务于工作。

要充分收集大量信息,让更多人发挥其智能优势,包括许多定性经验。比如,拿我国现有的 30~60 岁的农民,一般并不懂高等数学,但是他们的经验是生态控制实践的重要方面,他们的智慧不可忽视。

相信,随着工作的深入,ECME 将会有一天发展成为戴汝为院士所预料的更高层次——生态控制的大成智慧学。

参 考 文 献

于景元、涂元季. 2002. 从定性到定量综合集成方法. 系统工程理论与实践, No. 5: 1~5.

- 王寿云. 1988. 增订版说明. 见钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社.
- 方精云等. 2000. 全球生态学. 北京:高等教育出版社. 柏林:施普林格出版社.
- 朱廷耀等. 2001. 农田防护林生态工程学. 北京:中国林业出版社.
- 刘青松主编,张咏、郝英群编著. 2003. 农村环境保护. 北京:中国环境科学出版社.
- 毕思文等. 2002. 地球系统科学. 北京:科学出版社.
- 李新春等. 2002. 综合人工智能优化矿业工程复杂大系统. 系统工程学报, **17**:379~384.
- 李翔等. 2001. 神经网络结构的递归 T-S 模糊模型. 系统工程学报, **16**:268~273.
- 李新春. 1999. 基于综合人工智能技术的露天采矿工艺系统优化研究. 徐州:中国矿业大学出版社.
- 苗东升. 1998. 系统科学精要. 北京:中国人民大学出版社.
- 胡晓惠. 2002. 研讨厅系统实现方法及技术的研究. 系统工程理论与实践, No. 6:1~9.
- 夏军. 2002. 水文非线性系统理论与方法. 武汉:武汉大学出版社.
- 侯定丕. 1993. 管理科学定量分析引论. 合肥:中国科学技术大学出版社.
- 钱学森、于景元、戴汝为. 1990. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, **13**:3~10.
- 辛, M. D. 等. 1983. 大系统的最优化及控制. 周斌等译. 北京:机械工业出版社.
- 靳蕃等. 1993. 神经网络与神经计算机原理、应用. 西安:西安交通大学出版社.
- Emel'yanov, W. V., Buvovoi, W. A. and Yulevada, A. F. 1998. Control of indefinite nonlinear dynamic systems (induced internal feedback). In *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hu, X. H. et al. 1996. The research of the open complex gaint system by matasynthetic engineering. In *Prodeedings of 1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2396~2399. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House.
- Hu, X. H. et al. 1998. Hall for workshop of metasynthetic engineering: design issues and an example. In *Proceeding of the ICSSSE' 98*. 234~239. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House.
- Puccia, C. J. 1985. *Qualitative Modelling of Complex Systems*. Boston: Harvard University Press.
- Zhao, L. C., Zhang, O. L. and Yang, Q. C. 2002. Permanent in a predator-prey system by nonlinear Controls. *Journal of Biomathematics*, **17**: 201~207.

后 记

撰写《生态控制原理》这本书,旨在进一步明晰生态过程动力学机制,调控生态动力源和生态系统结构,增强生态系统功能,服务于可持续发展。以往,国内外已出版的著作中,相近著作有《控制论》《生物控制论》《生物进化控制论》《人口控制论》《经济控制论》等,然而,尚未见到与本著作框架、主要内容类同的书藉,少有借鉴。同时,囿于作者对生态过程动力学机制认识不够深刻和全面,尤其是生态控制问题,尽管把书写出来了,但依然有许多不足。它作为生态学中一门控制原理的著作,系统性欠佳,且各部分不够均衡,由于篇幅所限,有些问题未能深入展开。尽作者所能,奉献这本书,只要对研究生态动力学与控制原理的学者有所启迪,就心满意足了,但愿生态动力学与控制原理这项对可持续发展至关重要的研究,在科学百花园中鲜花绽放,硕果累累。

在蕴酿、构思和写作《生态控制原理》过程中,得到多方面专家、同仁和朋友的帮助,作者由衷地感谢全国人民代表大会常委会副委员长、中国科学院院长路甬祥院士,丑纪范院士、刘昌明院士、蒋有绪院士,中国工程院孙铁珩院士,中国科学院办公厅潘教峰副主任、中国科学院资源环境科学与技术局傅伯杰局长、陈泮勤副局长、生态环境处黄铁青处长、芮海凤研究员,中国科学院沈阳应用生态研究所何兴元所长、姬兰柱书记、武志杰副所长、原所长沈善敏研究员,沈阳大气环境研究所于系民研究员,《应用生态学报》孙顺江编审,沈阳新华印刷厂张凡桥厂长,辽宁美术出版社于世涛副编审、主任记者,中国科学院地理科学与资源研究所于静洁博士,中国科学院沈阳应用生态研究所宇万太研究员、王玉洁高级工程师,辽宁省物资局陈佩文女士,沈阳农机工业供销总公司王淑娟女士,中国医科大学裴秀丛博士生,中国科学院沈阳应用生态研究所李晓晏先生、赵洁伟女士、王安志博士、刘建梅博士生、吴家兵博士生、王平先生和毛春晖女士。

本书在写作过程中引用了国内外许多作者的论著或科技专家提供的有关资料,在此一并深表谢意。书中尽量注明原文出处,但因文献较多,如有疏漏,诚望见谅。

作者
2003年6月

2004年3月5日
赠送(作有)
75.00元

000027651

58.181
732

2003

生态控制原理

借书单位	借书姓名	借出日期	还书日期
------	------	------	------

58.181
732

000027651

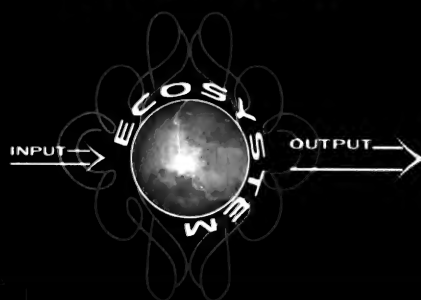
中科院植物所图书馆



S0001723

生态控制原理

裴铁璠 金昌杰 关德新 著



科学出版社
www.sciencep.com

ISBN 7-03-012522-3



9 787030 125224 >

ISBN 7-03-012522-3

定 价：75.00 元